

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE VETERINAIRE D'EL -HARRACH

..... - -

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE DOCTEUR VETERINAIRE

THEME :

**OPTIMISATION AERODYNAMIQUE DU CHEVAL DE
COURSE PAR SIMULATION NUMERIQUE**

Présenté par : Mr. Hassaine daouadji Ahmed

Soutenu le : 28/06/2009

Le jury :

Président : Mr Laamari

Maître assistant classe A ENSV-ALGER

Promotrice : Melle Berdous

Maître assistante classe A ENSV-ALGER

Examinatrice 1 : Melle Smai

Maître assistante classe A ENSV-ALGER

Examinatrice 2 : Mme Saadi

Maître assistante classe A ENSV-ALGER

Année universitaire : 2008/2009



Remerciements



Je tiens à remercier :

Melle Berdous , Maître assistante classe A à l'Ecole Nationale Supérieure Vétérinaire d'Alger, promotrice, qui m'a constamment encouragé et conseillé pour la réalisation de ce travail.

Mr Laamari , Maître assistant classe A à l'Ecole Nationale Supérieure Vétérinaire d'Alger d'avoir bien voulu accepter de présider le jury.

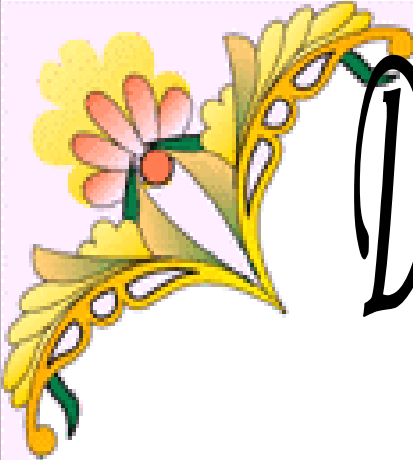
Melle smai , Maître assistante classe A à l'Ecole Nationale Supérieure Vétérinaire d'Alger pour avoir bien voulu examiner notre travail.

Mme saadi, Maître assistante classe A à l'Ecole Nationale Supérieure Vétérinaire d'Alger pour avoir bien voulu examiner notre travail.

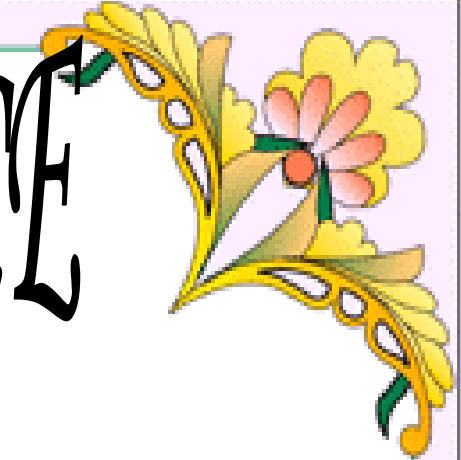


Je remercie surtout mon frère MOHCEN YOUSFI et tous ceux qui m'ont aidé du loin ou de près à réaliser ce travail.





DEDICACE



Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissances,

A ceux à qui je dois ma réussite. Aux personnes les plus chères dans ce monde, à mes parents, pour leur amour, leur dévouement et leur soutien tout au long de ces longues années d'étude. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail sans exception



AHMED



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Partie bibliographique

CHAPITRE I : AERODYNAMIQUE

I.1.La dynamique des fluides.....	2
I.2.Caractéristiques d'un fluide en écoulement	2
I.2.1. La compressibilité	2
I.2.2. La viscosité	3
I.3.Le régime d'écoulement	5
I.4.L'aérodynamique, généralités et définitions	6
I.4.1. L'aérodynamique incompressible	6
I.4.2. L'aérodynamique compressible	6
I.5.Les déterminants aérodynamiques	6
I.5.1. La force	6
I.5.2. La surface de référence S	7
I.6.Les coefficients aérodynamiques	7

Chapitre II : HIPPOLOGIE

II.1.Rôle de la morphologie du cheval	8
II.2.Tête et encolure	9
II.3.Poitrine	10
II.4.Dos et ventre	10
II.5.Allures du cheval	10

Partie expérimentale

1. Objectif	13
2. Simulation numérique	13
3. Logiciel de l'étude	14
3.1. Le pré processeur	15
3.2. Le solveur	16
3.3. Le post processeur	17
4. Critères du choix de maillage	18
4.1. Le temps de maillage	19
4.2. Le temps de calcul	19
5. Les conditions sur fluent	20
6. Méthodes de calcul	20
6.1. Conditions de l'étude	20
6.2. Les géométries de l'étude	21
7. Résultats et discussions	27
CONCLUSION GENERALE	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33
RESUME	

Liste des tableaux

Tableau 01 : comparaison entre l'arabe et le barbe	11
Tableau 02 : comparaison entre pur-sang anglais, quarter horse et l'akhal-téké	12
Tableau 03: Valeurs des surfaces de référence pour chaque géométrie	27
Tableau 04 : valeurs des forces totales appliquées sur les géométries: CHEVAL 1, 2, 3 et 4	28
Tableau 05 : valeurs des forces totales appliquées sur les géométries: CHEVALENCOLURE 1, 2 et 3	28
Tableau 06 : valeurs des forces totales appliquées sur les géométries: CHEVALLARGEUR 1, 2 et 3	29

Liste des figures

Figure 01 : Allure d'un écoulement du fluide parfait autour d'un cylindre	4
Figure 02 : Allure d'un écoulement du fluide visqueux autour d'un cylindre	4
Figure 03 : (a) Ecoulement d'eau en régime laminaire en surface et (b) Jet d'hélium pleinement turbulent	5
Figure 04 : différentes régions du corps du cheval.....	9
Figure 05 : interface du GAMBIT (pré- processeur).....	14
Figure 06 : Interface de FLUENT	16
Figure 07 : le post-processeur	17
Figure 08 : le post-processeur (courbes affichées après le calcul)	18
Figure 09 : géométrie du CHEVAL 1	21
Figure 10 : géométrie du CHEVAL 2	22
Figure 11 : géométrie du CHEVAL 3	22
Figure 12 : géométrie du CHEVAL 4	23
Figure 13: géométrie du CHEVALENCOLURE 1	23
Figure 14 : géométrie du CHEVALENCOLURE 2	24
Figure 15 : géométrie du CHEVALENCOLURE 3	24
Figure 16: géométrie du CHEVALLARGEUR 1	25
Figure 17 : géométrie du CHEVALLARGEUR 2	25
Figure 18 : géométrie du CHEVALLARGEUR 3	26
Figure 19 : evolution de la force totale en fonction de la vitesse de l'air pour les géométries dites: CHEVAL 1, 2, 3 et 4	29
Figure 20 : evolution de la force totale en fonction de la vitesse de l'air pour les géométries dites: CHEVALENCOLURE 1, 2 et 3	30
Figure 21 : evolution de la force totale en fonction de la vitesse de l'air pour les géométries dites: CHEVALLARGEUR 1, 2 et 3	30

Introduction générale

Introduction générale

La dynamique des fluides, branche particulière, à la fois de la mécanique des milieux continus et de la thermodynamique, a pour objectif l'étude des écoulements générés par le mouvement relatif d'un corps plongé dans un fluide.

La modélisation numérique s'est considérablement développée au cours de la dernière décennie. Plusieurs équipes de recherche dans le monde utilisent une centaine de logiciels qui résolvent les équations de la mécanique des fluides pour leurs besoins scientifiques.

Dans ce contexte, nous tenterons dans ce travail, d'appliquer un logiciel de calcul numérique appelé le *FLUENT*, destiné à la simulation de la conformation du cheval de course dans le but, d'une part, de mettre en évidence une nouvelle approche descriptive de la conformation. D'autre part, de pouvoir déterminer la meilleure conformation de point de vue aérodynamique.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous énoncerons quelques notions de base de la dynamique des fluides suivies d'un rappel anatomique de quelques chevaux de course.

Puis dans le deuxième chapitre, nous décrirons le logiciel ainsi que la méthode utilisée dans le calcul numérique, en tirant quelques résultats comparatifs entre plusieurs profils chevalins

Partie bibliographique

CHAPITRE I : AERODYNAMIQUE

Partie bibliographique

CHAPITRE I : AERODYNAMIQUE

I.1.La dynamique des fluides

Un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux, est aisément déformable, sans qu'il soit nécessaire de lui appliquer de grandes contraintes sur son contour.

En mécanique des milieux déformables, le fluide est décrit par une équation de comportement qui lie la contrainte locale au taux de déformation (ou à la vitesse), elle relève aussi de la thermodynamique à travers l'équation d'état, qui exprime la relation entre la masse volumique, la pression et la température.

La dynamique des fluides est la science qui étudie l'écoulement des fluides dont il s'agit de déterminer les propriétés (pression, vitesse, température, masse volumique, etc.) dans tout le champ du mouvement comme des fonctions de l'espace et du temps. Cette discipline se décline dans de nombreuses applications comme par exemple l'aérodynamique, l'hydrodynamique ou encore la météorologie.

Les équations fondamentales de la dynamique des fluides expriment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, elles constituent un système complexe d'équations aux dérivées partielles (équations dites de Navier-Stokes), qu'il n'est envisageable de les résoudre que numériquement ou dans des cas de figure permettant de les simplifier.

En fonction du fluide à étudier ou du type d'écoulement considéré, il est parfois possible de négliger certains termes des équations ou de considérer certaines propriétés du fluide constantes au cours du mouvement, ce qui rend les équations plus faciles à résoudre.

I.2.Caractéristiques d'un fluide en écoulement

Au cours de son écoulement, le fluide peut être défini par plusieurs paramètres, à savoir :

I.2.1. La compressibilité

Un écoulement est dit compressible si les variations de pression sont suffisamment importantes pour engendrer des modifications non négligeables de la masse volumique du fluide considéré. Les

écoulements de liquides ou des gaz qui ont des vitesses très inférieures à la vitesse du son sont dits incompressibles, et l'on considère alors la masse volumique du fluide constante, ce qui permet de simplifier les équations de Navier-Stokes.

En pratique, il existe un nombre sans dimension bien connu en aérodynamique c'est le nombre de Mach (M), défini comme étant le rapport entre la vitesse de l'écoulement V et la vitesse du son v , tel que:

$$M = V/v \quad \text{Formule 1}$$

Le nombre de Mach permet de distinguer le régime subsonique ($M < 1$), supersonique ($1 < M < 5$) et hypersonique ($M > 5$), du fluide.

I.2.2. La viscosité

Au cours du mouvement d'un fluide, les molécules transportent leur masse, leur quantité de mouvement et leur énergie d'un point à un autre du milieu. Ces processus de transport à l'échelle macroscopique se traduisent par les phénomènes de diffusion de masse et de quantité de mouvement ainsi que par la conduction thermique.

La diffusion de la quantité de mouvement s'effectue par frottement des couches du fluide les unes sur les autres et le coefficient de diffusion associé est la *viscosité*. Cette propriété est notamment à l'origine d'efforts de frottement lorsque le fluide est en contact avec une paroi solide, sa contribution n'est cependant pas systématiquement primordiale pour obtenir une restitution correcte de la réalité d'un écoulement, sous certaines conditions; la viscosité peut être négligée, on considère alors un fluide à viscosité nulle (Fluide parfait).

Lorsqu'on souhaite évaluer si l'approche fluide parfait peut être envisagée pour un problème, on a recours au nombre de Reynolds R_e :

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad \text{Formule 2}$$

Où ρ est la masse volumique du fluide

μ est la viscosité du fluide

V est une échelle de vitesse caractéristique du problème

L est une échelle de longueur similaire

Ce nombre permet de comparer les effets d'inertie liés à la quantité de mouvement du fluide, et les effets visqueux liés à la viscosité.

Pour une faible valeur du nombre de Reynolds, l'écoulement est dit de *Stokes*, pour lequel les effets visqueux sont prépondérants et les forces d'inertie sont négligeables. Pour une grande valeur du nombre de Reynolds, les effets d'inertie dominent les effets visqueux et il devient donc licite d'adopter le modèle du fluide parfait.

De plus, si le nombre de Reynolds est élevé, et lorsque le problème à traiter contient des parois, il n'est plus possible de négliger la viscosité au voisinage de celles-ci, car le fluide s'arrête sur la paroi, et un mouvement à vitesse plus faible prend naissance dans une zone confinée au voisinage immédiat des parois : c'est la *couche limite*. Au sein de cette zone, la vitesse varie donc de zéro à la paroi jusqu'à V_∞ sur la frontière supérieure de la couche limite, comme le montre la figure 1.

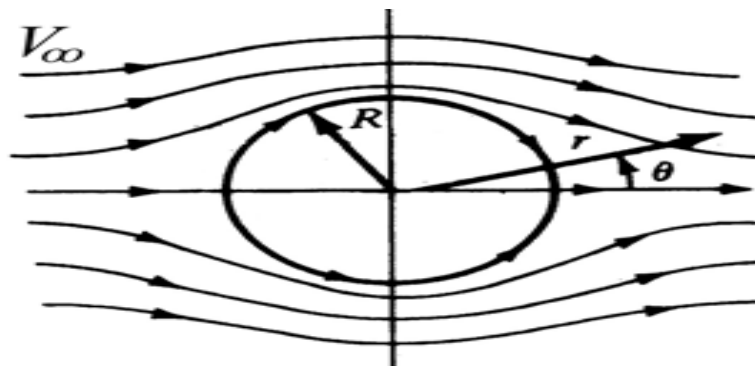


Figure 01 : Allure d'un écoulement du fluide parfait autour d'un cylindre.

Par contre, lorsqu'on prend en compte la viscosité du fluide, on retrouve un effort de traînée, qui provient à la fois des frottements pariétaux ainsi introduits, et d'une dissymétrie de la répartition de pression comme illustré sur la figure 2.

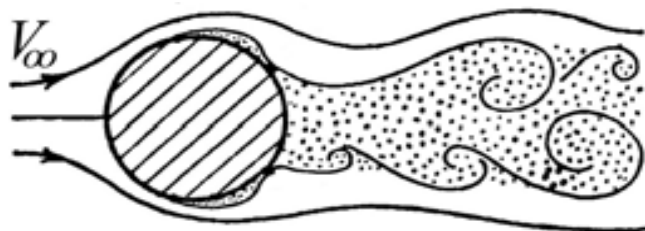


Figure 02 : Allure d'un écoulement du fluide visqueux autour d'un cylindre.

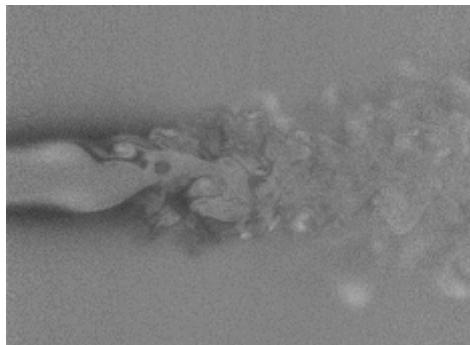
I.3. Le régime d'écoulement

Une autre caractéristique importante en dynamique des fluides concerne le régime d'écoulement dans lequel on se place. On est ainsi amené à considérer deux grandes catégories d'écoulements : les écoulements laminaires et les écoulements turbulents.

Le régime laminaire se caractérise par un glissement des couches fluides les unes sur les autres (Figure 3(a)). Il présente une régularité structurelle qui se traduit au niveau des variables de l'écoulement (vitesse, pression, masse volumique, température...etc.), par des variations de faible amplitude et très basses fréquences. Par contre, le régime turbulent se distingue par une agitation du fluide et l'apparition de structures tourbillonnaires (Figure 3(b)).



(a)



(b)

Figure 03 : (a) Ecoulement d'eau en régime laminaire en surface et (b) Jet d'hélium pleinement turbulent..

I.4.L'aérodynamique, généralités et définitions

L'aérodynamique est une branche de la dynamique des fluides qui porte principalement sur la compréhension et l'analyse des écoulements d'air, ainsi qu'éventuellement sur leurs effets sur des

éléments solides qu'ils environnent. L'aérodynamisme qualifie un corps en mouvement dans l'air. Le champ d'études peut se subdiviser en aérodynamiques incompressible et compressible en fonction du nombre de Mach.

I.4.1. L'aérodynamique incompressible

Concerne les écoulements pour lesquels le nombre de Mach est inférieur à 0,3 environ, et se placer dans cette classe d'écoulements permet de prendre certaines hypothèses simplificatrices lors de l'étude de ces écoulements.

I.4.2. L'aérodynamique compressible

Quant à elle, se subdivise en aérodynamique : subsonique à Mach compris entre 0,3 et le Mach critique, ce qui correspond à une vitesse d'écoulement localement supérieure à la vitesse du son ; transsonique à Mach compris entre le Mach critique et 1 ; supersonique à Mach entre 1 et 5 et hypersonique au-delà.

I.5. Les déterminants aérodynamiques

Sont essentiellement la force et la surface de référence :

I.5.1. La force

Le champ de pression s'exerçant sur un obstacle induit globalement un torseur d'efforts où l'on considère généralement :

1. une force de traînée : F_x , parallèle à la direction moyenne de l'écoulement
2. une force de dérive: F_y , perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement, dans le plan horizontal
3. une force de portance: F_z , perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement, dans le plan vertical.

L'expression de la force F se donne par la formule suivante :

$$F = q \cdot S \cdot C$$

Formule 3

Où S est la surface de référence

C est le coefficient aérodynamique

q est la pression dynamique

Le coefficient de traînée C est le rapport de la traînée de l'objet étudié à celui d'un corps de même surface qui aurait un C_x égal à 1. En aviation, le coefficient de résistance est désigné par le coefficient de traînée, rapporté dans le cas de l'aile à sa surface projetée. La traînée totale est la somme de la traînée parasite (non liée à la portance) et de la traînée induite par la portance. En aérodynamique automobile, connaître le C_x n'est pas une condition suffisante, il est nécessaire de savoir aussi la surface frontale du véhicule.

Par contre, l'équation de la portance est similaire à celle de la traînée avec C_x remplacé par C_z ou bien C_y pour une portance latérale.

1.5.2. La surface de référence S

1. pour une surface portante généralement bien profilée, S est la surface projetée dans le plan horizontal (ou dans le plan vertical pour un empennage vertical ou une dérive).
2. pour un objet à forte traînée de forme (traînée de pression) comme une automobile, dont le C_x est cinq à huit fois celui d'un fuselage d'avion, on prend plutôt le maître-couple (la surface frontale).

1.6. Les coefficients aérodynamiques

Les coefficients aérodynamiques sont des coefficients adimensionnels servant à quantifier les forces en x, y et z :

1. C_x : le coefficient de traînée.
2. C_y : le coefficient de portance latérale.
3. C_z : le coefficient de portance.

Ces coefficients sont déterminés en mettant:

$$C_{x,y,z} = \frac{F_{x,y,z}}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad \text{Formule 4}$$

Où S est la surface de l'objet concerné projetée orthogonalement à la direction {x, y, z}.

V est la vitesse relative du vent sur l'objet.

- ρ est la masse volumique du fluide

Chapitre II :

HIPPOLOGIE

Chapitre II : HIPPOLOGIE

II.1. Rôle de la morphologie du cheval

L'anatomie externe d'un cheval peut être une source de renseignement importante sur ses qualités et ses défauts, pour apprécier sa conformation (figure 04), son squelette et le volume que forme son corps, ses membres, sa tête et son encolure doivent être prises en compte.

Les critères de bonne conformation d'un cheval varient selon les races, chez le pur-sang, par exemple, conçu pour la vitesse, le corps et les membres s'inscrivent dans un rectangle horizontal. Chez les chevaux de trait lourds, comme l'ardennais, ils forment un rectangle vertical, tandis que chez l'arabe et la plupart des chevaux de selle, qui se situent entre les deux extrêmes de la course et du trait, ils s'inscrivent dans un carré parfait. (ELWIN H. E., 1992)

Chez un cheval parfaitement conformé, certaines proportions sont invariables, par exemple, la longueur de la tête, les distances point de jarret/sol, châtaigne/sol, pointe de jarret/pli du grasset, pli du grasset/pointe de la croupe et ligne de dessus/ligne de dessous doivent être égales. Les distances grasset/pointe de la fesse, pointe de la fesse/croupe et croupe/grasset doivent aussi être égales; les distances boulet/base de l'épaule et base de l'épaule/garrot doivent être sensiblement égales.

Le meilleur moyen d'apprécier un cheval est d'évaluer tous les rapports relatifs des différentes parties de son corps. Une caractéristique importante, révélant la capacité thoracique d'un cheval, est l'ampleur de sa poitrine. En effet, pour qu'un cheval soit apte à la course, ce qui exige de gros efforts respiratoires, il faut qu'il ait du *coffre* ou du *corsage*, en d'autres termes que la distance entre le sommet du garrot et le sternum à la base de l'épaule soit au moins égale à la distance entre le sternum et le sol.

Pour un cheval destiné au galop, l'encolure doit être relativement longue, environ une fois et demi la longueur de la tête mesurée du sommet du crâne à la lèvre inférieure.

Une encolure courte ou épaisse peut être recherchée pour un cheval de trait ou de dressage mais n'est jamais un signe de vitesse. Pour que le cheval soit bien soudé, le dos allant du garrot aux reins doit être deux fois plus court que la distance séparant la pointe de l'épaule de la dernière cote. (ELWIN H. E., 1992)

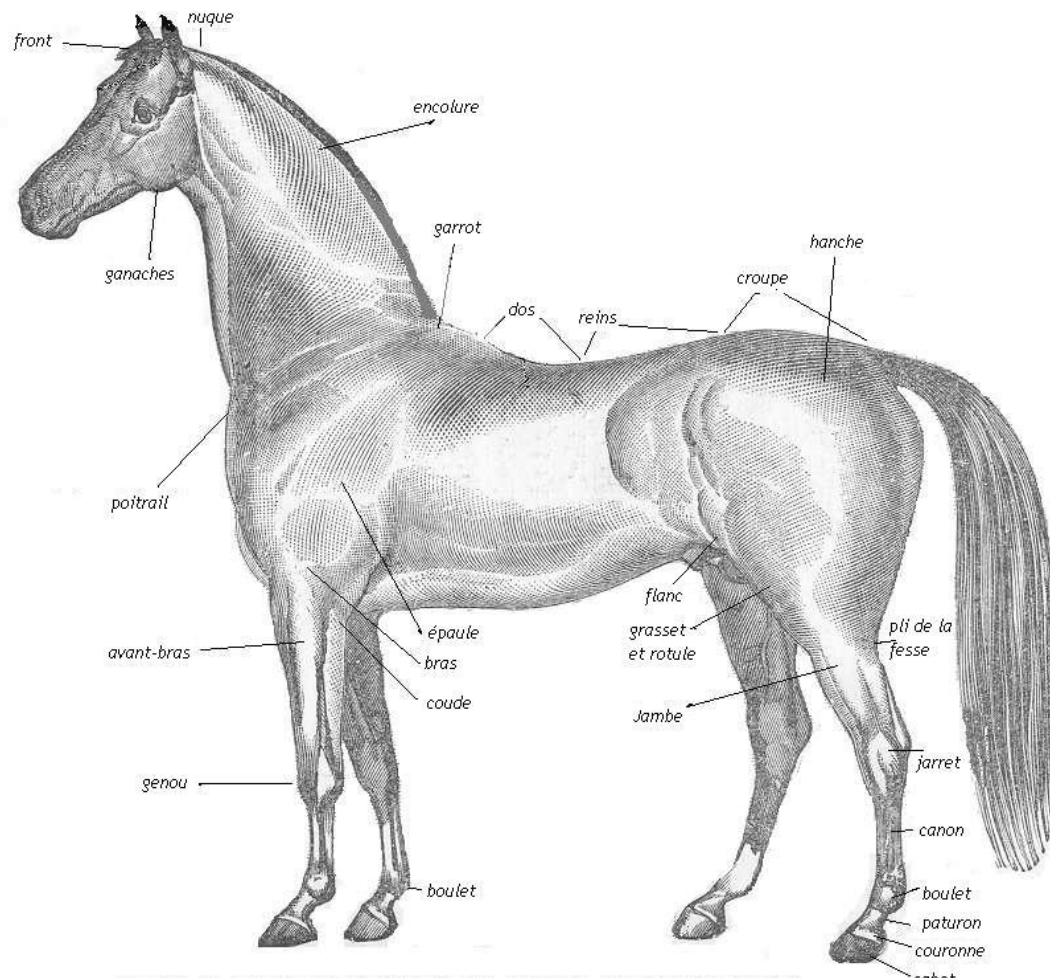


Figure O4 : différentes régions du corps du cheval.

II.2.Tête et encolure

La tête fournit de nombreux éléments d'appréciation sur le cheval. Chez un cheval de bonne conformation, la tête est bien ciselée, nette et sans signes d'empâtement. Sa longueur doit être en harmonie à la fois avec le profil, rectiligne, convexe ou concave, et avec le corps tout entier.

Une tête trop massive pour l'encolure, alourdit son avant-main et détruit son équilibre; de même qu'une tête trop légère, l'encolure doit être souple et proportionnée à la longueur de l'animal, sans démarcation avec le garrot. Au repos, l'encolure et la tête doivent former un angle de 90 degrés, s'il est plus ouvert le cheval porte au vent, plus fermé, il s'encapuchonne.

II.3.Poitrine

La poitrine ne doit être ni trop ouverte ni trop étroite. Trop étroite le cheval devient *mal corseté*. Elle indique alors un manque de souffle.

Trop ouverte, elle peut être un bon signe pour un cheval de trait, mais n'est pas compatible avec la vitesse.

II.4.Dos et ventre

Pour que la ligne de dessous soit conforme, le garrot et la pointe de la croupe, à l'avant et à l'arrière du dos doivent être autant que possible à la même hauteur. Dans le cas contraire, le cheval est fait en montant ou en descendant, un dos plongeant (basculant vers l'avant).

II.5.Allures du cheval

On appelle allure, les différentes façons selon lesquelles un cheval se meut. On reconnaît partout dans le monde les trois allures naturelles qui sont, le pas, le trot et le galop auxquelles s'ajoute le galop allongé. Certaines races ont par ailleurs des allures particulières issues de l'amble, comme le poney islandais (tolt), le selle américain (slow gait), le trotteur américain (amblé) et les tenesse walker (running walk). Le galop de course (allongé) est une allure à quatre temps sautée, asymétrique et basculée (l'axe longitudinal du corps subit d'amblés oscillations). Dans cette allure le deuxième temps du galop (bipède diagonal) est associé en deux temps, chaque un des pieds du cheval frappant successivement le sol. Exemple, postérieur gauche, postérieur droit, antérieur gauche, antérieur droit. Un cheval au galop peut dépasser 60 km/h. (ELWIN H. E., 1992).

Les tableaux 1 et 2 résument les différentes caractéristiques morphologiques de quelques races chevalines.

En Algérie, l'arabe et le pur-sang anglais sont souvent utilisés dans les courses, alors que le barbe reste le cheval préféré de la fantasia traditionnelle.

Tableau 01 : comparaison entre l'arabe et le barbe (ELWIN HARTLEY EDWARDS, 1992).

Race	Taille (au garrot)	Tête	corps
<i>Arabe</i>	entre 1,42m et 1,50 m.	fine et petite, avec un front plat et un profil le plus souvent concave	Dos court, légèrement concave, des reins courts et larges, une croupe ample et horizontale
<i>Barbe</i>	entre 1,42m et 1,52m.	plutôt longue, avec un profile rectiligne ou franchement convexe	dos court et droit, très fort jusqu'à la chute de la croupe ; le passage des sangles est souvent marqué d'un creux.

Partout dans le monde; il existe différentes races utilisées en course tel que l'akhal-téké, le quarter horse et le pur-sang.

Tableau 02 : comparaison entre pur-sang anglais, quarter horse et l'akhal-téké (ELWIN HARTLEY EDWARDS, 1992).

Race	Taille (au garrot)	Tête	corps
<i>Pur-sang anglais</i>	en moyenne de 1,60m, mais selon l'emploi du cheval peut varier entre 1,42m (promenades) à 1,73m (chasse à courre)	petite et bien attachée, le profil contrairement à celui des ancêtres arabes de la race, est rectiligne, oreilles longues et mobiles	une encolure longue et fine, un garrot nettement saillant, des épaules inclinées, longues et musclées ; sont des traits caractéristiques du pur-sang anglais
<i>Akhal-téké</i>	1,52m en moyenne, les juments sont plus souvent petites	légère et élégante avec un long profil rectiligne, des oreilles longues et bien séparés	encolure longue et fine, bien attachée aux épaules, hautes et très oblique. Elle fait avec la tête un angle de 45 degrés et la bouche est très haute par rapport au garrot
<i>Quarter horse</i>	entre 1,43m et 1,6m		dit <i>athlète</i> , car il est bien musclé et rapide ; considéré comme l'équivalent dans le monde équin d'un coureur de 100 mètres au mieux de sa forme.

Partie expérimentale

Partie expérimentale

1. Objectif

Dans cette partie, on va d'une part, mettre en évidence l'application d'un logiciel de calcul numérique utilisé dans la description aérodynamique du cheval de course. D'autre part, entamer une étude comparative entre les différents profils chevalins.

2. Simulation numérique

Le développement extraordinaire de l'informatique a entraîné pour les sciences de l'ingénieur une révolution dans les méthodes d'études théoriques. Cette révolution, qui remonte au début des années soixante, a conduit à l'émergence de nouvelles disciplines, telles que la Mécanique des Fluides Numérique ou *CFD (Computational Fluid Dynamics)*. Elle joue un rôle de plus en plus important dans la conception et l'optimisation des engins navals ou aériens. Nous avons vu que les écoulements du fluide peuvent être décrits par un système d'équations aux dérivées partielles (le modèle de Navier-Stokes) que l'on ne peut résoudre analytiquement que dans des cas très simplifiés. Il est donc intéressant de chercher à obtenir numériquement des solutions approchées de ces équations. C'est le rôle de la *Mécanique des Fluides Numérique*.

L'approche expérimentale permet, moyennant le respect d'un certain nombre de conditions dites de *similitude*, de reproduire sur modèles réduits des écoulements représentatifs de la réalité (il faut notamment que le nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement sur le modèle réduit soit identique, ou tout au moins le plus proche possible, du nombre de Reynolds réel). Cette approche est alors un bon moyen pour mesurer des paramètres globaux tels que par exemple, dans le domaine de l'aérodynamique, la portance et la traînée d'un corps ainsi que ses coefficients d'échange thermique. Toutefois, dans certains cas, les mesures expérimentales ne permettent pas d'avoir accès à toutes les grandeurs nécessaires pour décrire suffisamment un écoulement. (FAVRE A., et al., 1976)

Il apparaît alors qu'une alternative à l'expérimentation doit être trouvée. Or, certains problèmes rencontrés dans la mise en place d'une expérience peuvent facilement être résolus par un traitement numérique de la configuration. Par exemple, si l'on veut reproduire dans une soufflerie un écoulement autour d'une voiture en mouvement, il est non seulement nécessaire de souffler de l'air sur la maquette de la voiture à la vitesse permettant d'obtenir le nombre de Reynolds équivalent à la situation réelle, mais il faut également que le sol sur lequel repose le modèle réduit soit en

mouvement à la même vitesse que le vent. Un tel montage est parfois difficile à réaliser expérimentalement, mais ne pose par contre aucun problème du point de vue numérique.

3. Logiciel de l'étude

Le logiciel utilisé est le *FLUENT*. C'est un code numérique de simulation d'écoulements des fluides et des transferts thermiques, qui se base sur la méthode des volumes finis. Cette dernière est une formule générale et classique rencontrée dans les problèmes physiques mathématiques qu'ils soient linéaires ou dépendants du temps (NOUGIER J. P., 1991)

Le principe de la méthode des volumes finis est de faire un maillage d'un domaine (D) donnée par une grille formée de points du domaine (Figure 05)

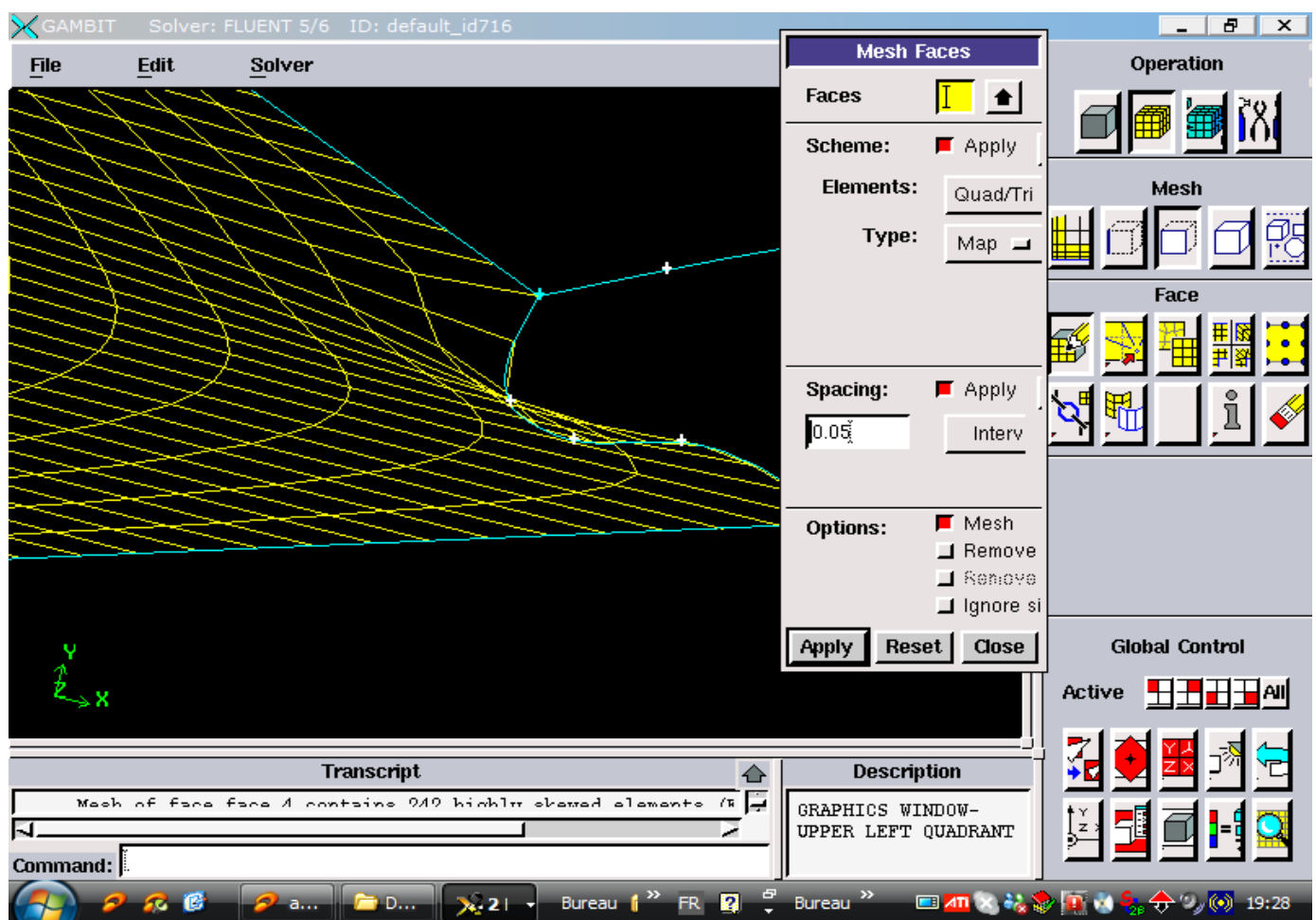


Figure 05 : interface du GAMBIT (pré- processeur).

Comme tout logiciel de *CFD*, le *Fluent* est composé de trois éléments : le pré-processeur, le solveur et le post-processeur.

3.1. Le pré processeur

La définition du problème à résoudre s'effectue à l'aide du pré-processeur *GAMBIT*. Il permet la :

1. Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
2. Intégration des équations différentielles sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, (les inconnues), telles que les vitesses, pression, température ...etc.
3. Linéarisation des équations discrétisées et résolution du système d'équations linéaires algébriques résultants, en utilisant la méthode de *GAUSS- SEIDEL*.

Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine, en proposant plusieurs algorithmes de maillage suivant la forme de la géométrie, et peut définir le type des conditions limites aux frontières du domaine.

Le menu *GRID* qui apparaît dans l'interface du *FLUENT* est lié au pré-processeur ; il nous permet principalement grâce à la fonction *GRID CHECK* de vérifier la validité du maillage.

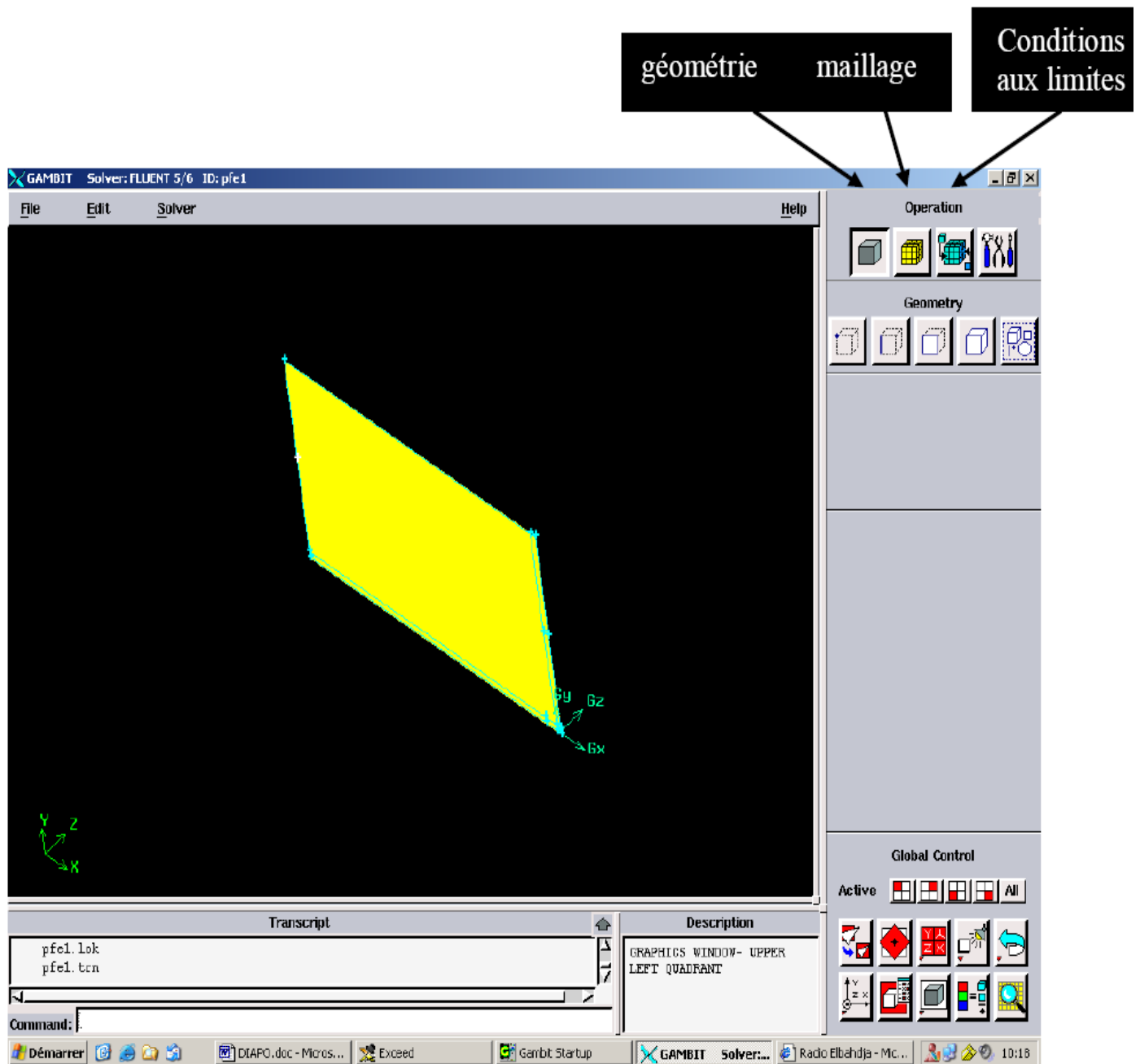


Figure 06 : Interface de FLUENT. (NOUGIER J. P., 1991)

3.2. Le solveur

Le *SOLVEUR* permet, à partir du menu *SOLVER* qui apparaît dans l'interface du *FLUENT* présenté par la figure 07, de :

1. définir numériquement les conditions aux limites opératoires (pression, température, flux de chaleur, vitesse,...) dans lesquelles est effectué la simulation
2. spécifier les propriétés du fluide et des matériaux utilisés
3. choisir le régime d'écoulement et le modèle de turbulence à adopter

4. choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression.

Il offre également une interface permettant de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

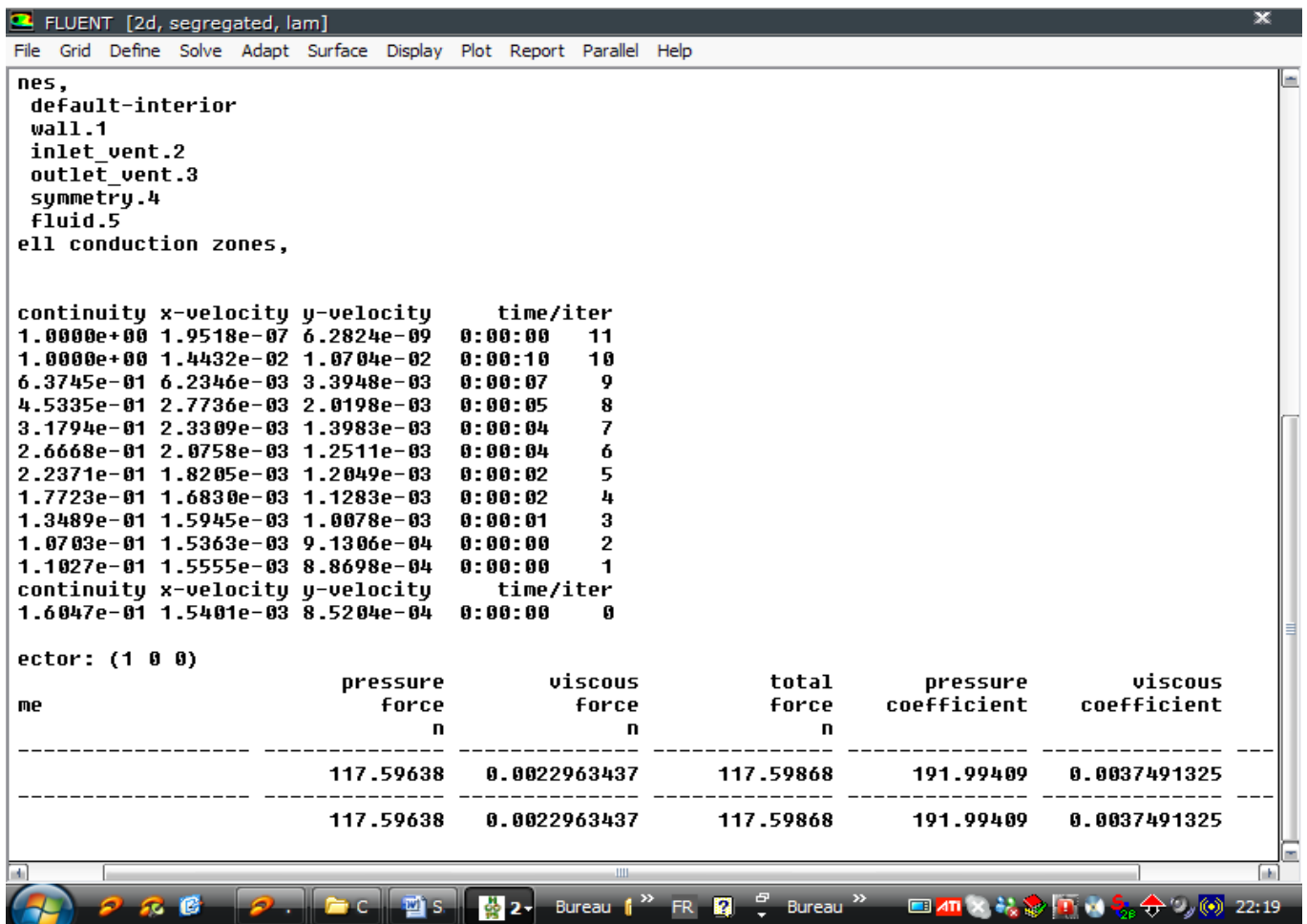


Figure 07 : le post-processeur

3.3. Le post processeur

Le post processeur (Figure 08) permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, et d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser à l'aide du menu *DISPLAY*, les champs de vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il permet aussi de visualiser les lignes de courant ou les trajectoires des particules.

Le menu *PLOT* offre également la possibilité de tracer des profils de certaines grandeurs sur les lignes et des droites bien définies.

Le menu *REPORT* permet de récupérer les valeurs numériques des grandeurs tels que les flux de chaleur, les vitesses moyennes, les débits de masse sur les surfaces qu'on définit.

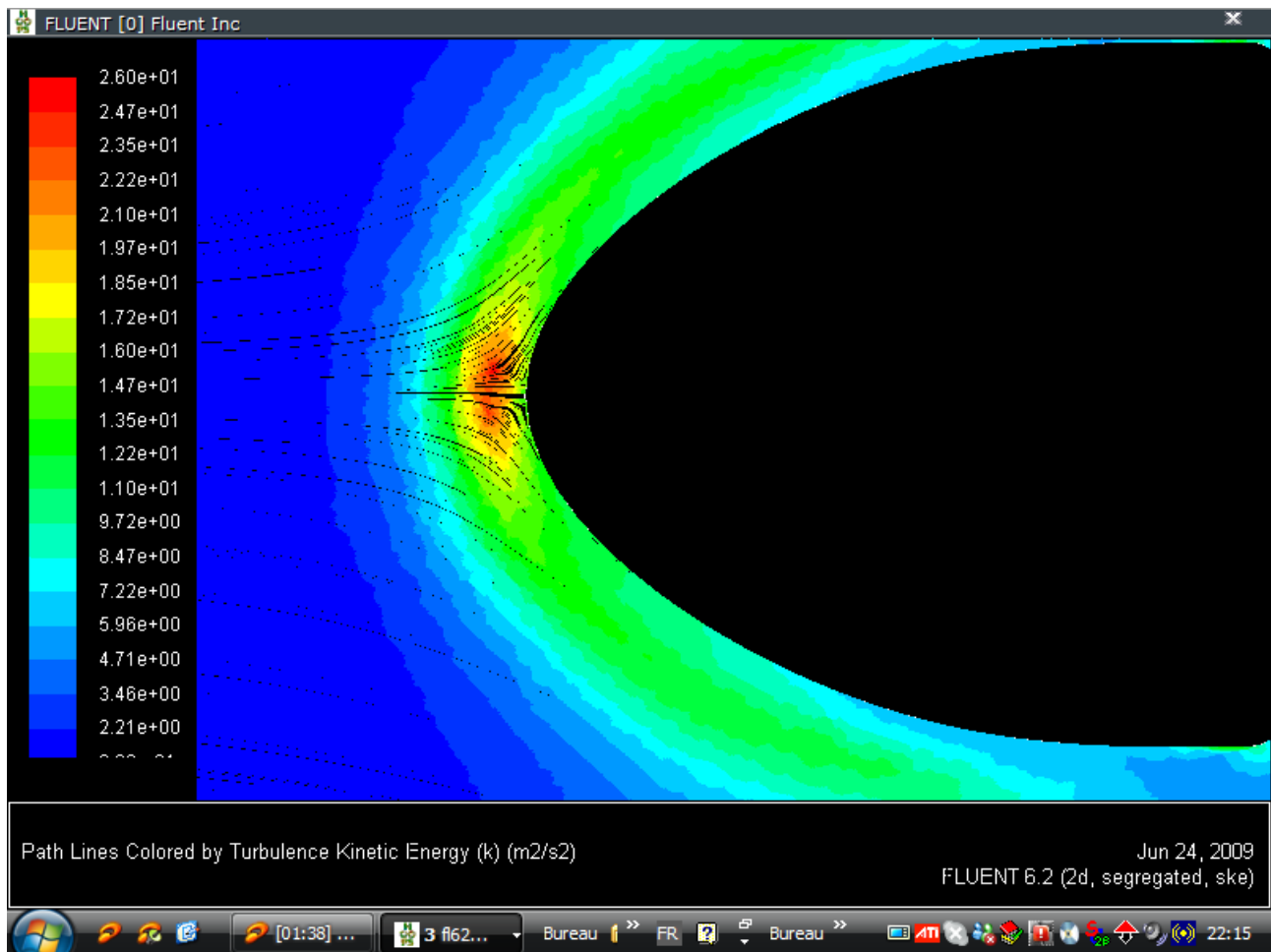


Figure 08 : le post-processeur (courbes affichées après le calcul)

4. Critères du choix de maillage

Le *FLUENT* met à la disposition de l'utilisateur une variété de choix des formes de cellules pour le maillage de la géométrie. Des cellules quadrilatères triangulaires ou les deux à la fois pour des géométries en deux dimensions. Des cellules tétraédriques, hexaédriques, pyramidales, et parallélépipédiques pour des géométries en trois dimensions.

Le choix des types de cellules pour le maillage doit respecter certains critères et qui sont relatifs essentiellement à notre application, aux phénomènes physiques que l'on souhaite faire apparaître (proche ou loin de la paroi), mais surtout en choisissant le type de maillage il faut penser aux points suivants : le temps de maillage et le temps de calcul.

4.1. Le temps de maillage

Beaucoup d'applications dans l'ingénierie nécessitent la modélisation de problèmes de géométries complexes. La génération d'un maillage structuré ou structuré par blocs (contenant des éléments quadrilatéraux/hexaédriques) peut prendre beaucoup de temps et même impossible pour certaines configurations. C'est pour cela que, pour de telles géométries, on a tendance à utiliser des maillages non structurés moyennant des éléments triangulaires/hexaédriques. Pour des géométries simples, le temps de maillage peut être similaire pour les deux types.

4.2. Le temps de calcul

Si la géométrie est complexe ou si les dimensions du domaine de l'écoulement sont importantes, un maillage triangulaire/tétraédrique peut être créé avec un moindre nombre de cellules que pour un maillage équivalent en quadrilatéral/hexaédrique. Ceci par le fait que le maillage triangulaire/tétraédrique permet la segmentation des cellules dans des régions bien définies du domaine fluide, lorsqu'un maillage structuré force généralement les cellules à être placées dans des régions parfois superflues ; un maillage non structuré quadrilatéral/hexaédrique offre les mêmes avantages qu'un maillage triangulaire/tétraédrique sur ce point.

Une caractéristique des éléments quadrilatéraux/hexaédriques est qu'ils peuvent être plus économiques dans certaines situations dans la mesure où ils permettent d'obtenir un ratio d'aspect plus grand. Celui-ci est défavorable pour le cas d'un maillage triangulaire/tétraédrique du moment qu'il affecte l'aplatissement des éléments ce qui est indésirable et peut causer une divergence lors de calcul.

5. Les conditions sur *FLUENT*

Les conditions aux limites spécifient l'écoulement et les variables thermiques aux frontières de notre modèle physique. Elles représentent une composante critique de la simulation sur le *FLUENT*, et elles doivent être soigneusement spécifiées.

Les conditions aux limites sont classées de la manière suivante sur le *FLUENT* :

1. Ecoulements entrants et sortants : *pressure inlet, velocity inlet, mass flow inlet, inlet vent, intake fan...etc.*
2. Murs et frontières polaires : *Wall, Axis...etc.*
3. Zones internes : *fluid, solid.*

Avant de mettre les conditions aux limites et lancer le calcul par *FLUENT*, il faut activer les options suivantes :

1. énergie : si on a des calculs de température et de transfert de chaleur dans notre modèle.
2. k- ϵ réalisable puisque c'est le modèle de turbulence le plus utilisé dans le cas de calculs des écoulements turbulents, et il donne des bons résultats.
3. gravité : si on considère les forces de flottabilité et d'inertie présentes dans notre modèle.
4. axisymétrie : quand on suppose que l'écoulement est bien réparti sur l'obstacle ou le modèle à étudier, et qu'il est symétrique par rapport à un axe.

6. Méthodes de calcul

6.1. Conditions de l'étude

Dans notre cas, nous avons supposé un fluide qui est l'air s'écoulant autour d'un obstacle bidimensionnel, qui est le corps d'un cheval. Plusieurs conformations chevalines ont été choisies et simulées en considérant les conditions suivantes :

1. Pression atmosphérique constante: 101325 Pascal (*INLET* et *OUTLET PRESSURE*)
2. vitesses d'entrée de l'air : pour chaque obstacle étudié (cheval bidimensionnel) on a supposé six vitesses successives : allant de 20 à 70 km/h, par pas de 10, à fin de voir l'évolution des vitesses de sorties pour chaque modèle et pour chaque une des vitesses entrantes.
3. turbulence supposé : on a supposé le modèle le plus utilisé, celui de k- ϵ standard.
4. calcul fait avec une précision de 0.00001 et de 300 itérations.

6.2. Les géométries de l'étude

La simulation de l'écoulement de l'air autour d'un cheval de course, n'est possible que si on élimine certaines composantes de son profil bidimensionnel, essentiellement les membres antérieurs et postérieurs et de négliger l'effet du cavalier (jockey), comme le montre la figure 09, et ceci a fin de permettre le passage numérique de l'air autour de son corps pour avoir une idée générale sur l'influence de la forme bidimensionnelle du cheval sur ses performances, en particulier la vitesse, lors d'une course.

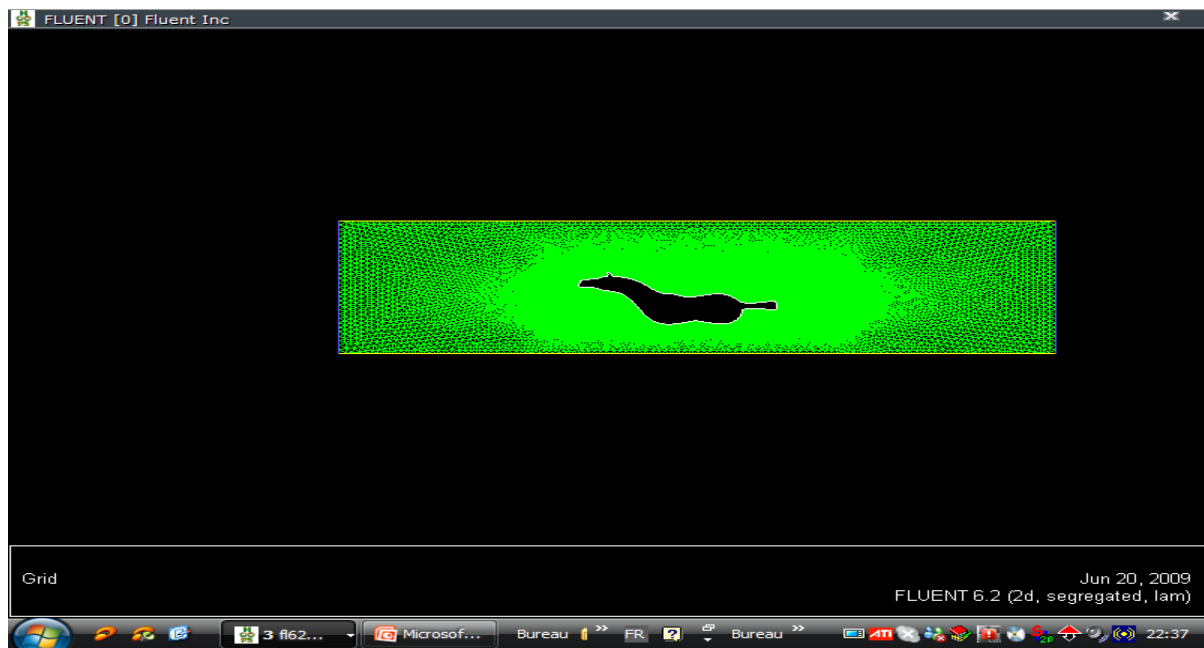


Figure 09 : géométrie du CHEVAL 1

De plus, dans le but d'étudier d'une part, l'effet qu'apportent les différentes composantes de la conformation à savoir, la longueur, la largeur et la largeur de l'encolure sur l'écoulement de l'air. D'autre part, pour pouvoir faire une étude comparative visant à déterminer une meilleure optimisation aérodynamique de la conformation du cheval de course, nous avons proposé les géométries données par les figures 09-18.

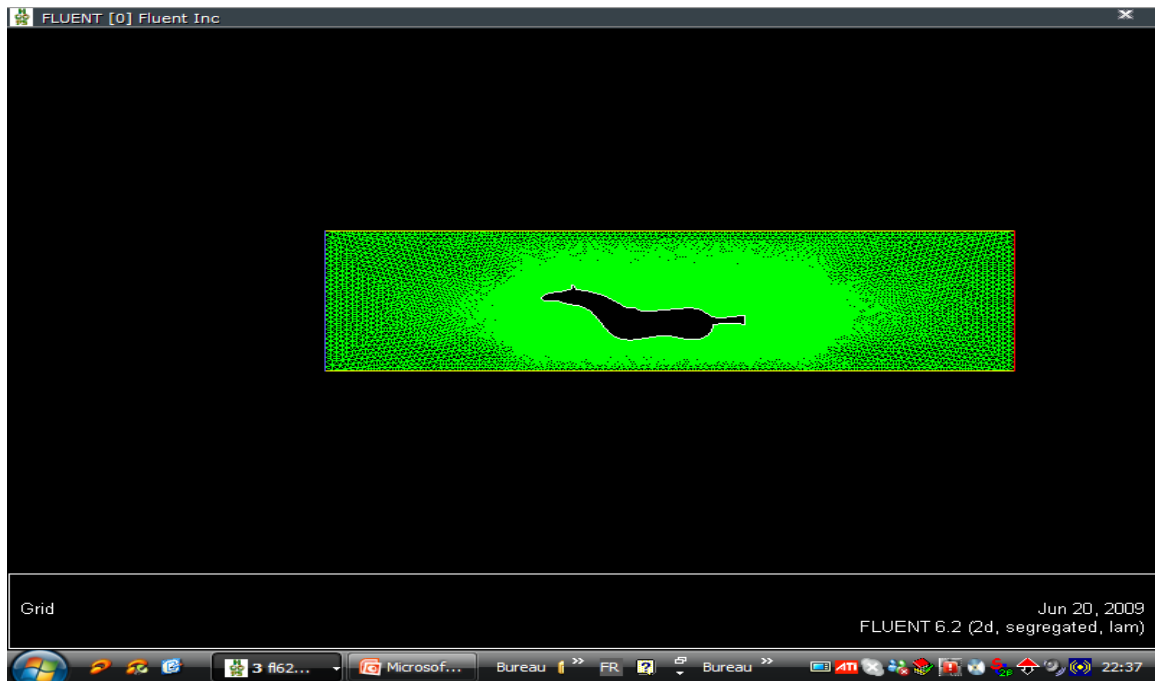


Figure 10 : géométrie du CHEVAL 2

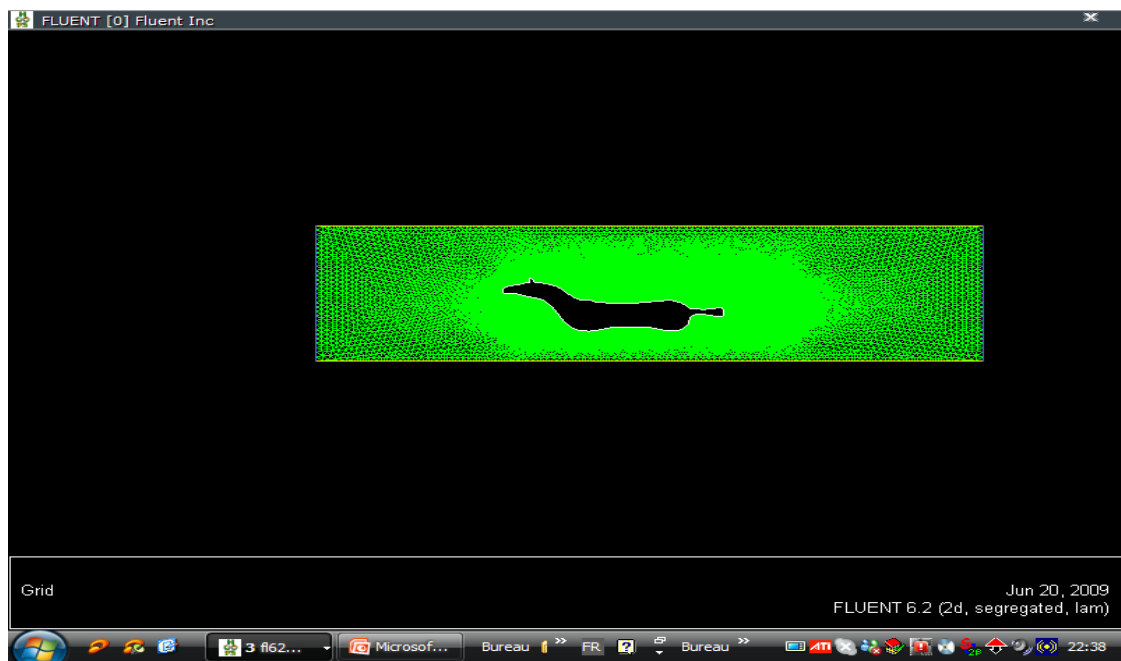


Figure 11 : géométrie du CHEVAL 3

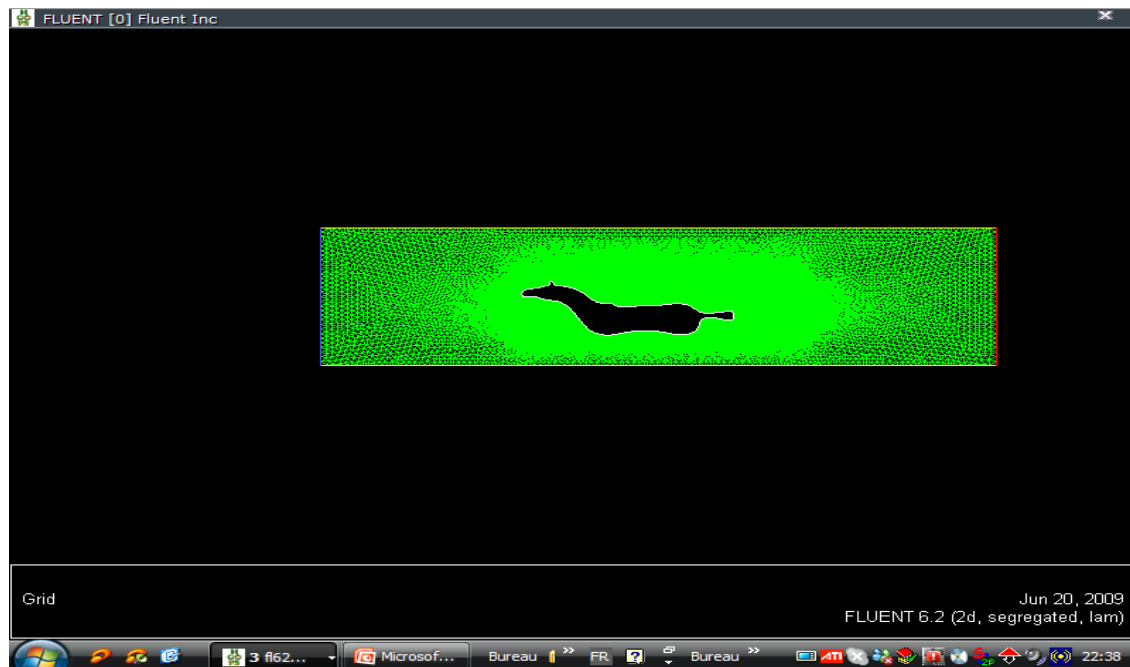


Figure 12 : géométrie du CHEVAL 4



Figure 13 : géométrie du CHEVALENCOLURE 1



Figure 14 : géométrie du CHEVALENCOLURE 2



Figure 15 : géométrie du CHEVALENCOLURE 3



Figure 16: géométrie du CHEVALLARGEUR 1



Figure 17 : géométrie du CHEVALLARGEUR 2

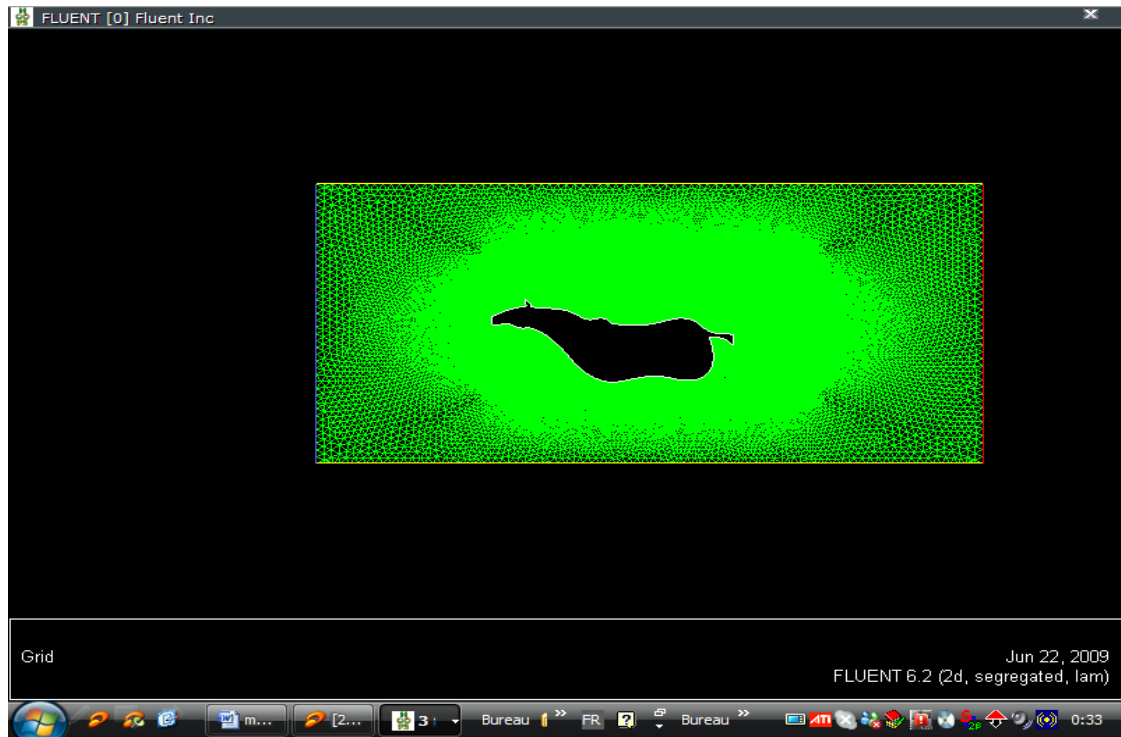


Figure 18 : géométrie du CHEVALLARGEUR 3

1. Pour les géométries dites CHEVAL 1, 2, 3 et 4, qui sont respectivement, représentées par les figures 09, 10, 11 et 12, nous avons fait varier la longueur par pas de 20 cm par rapport la géométrie de référence (CHEVAL 1), c'est-à-dire, les distances entre les pointes des fesses et la projection du sommet du garrot sur la ligne horizontale imaginaire passant par la pointe des fesses pour les ; CHEVAL 1, 2 et 3 sont respectivement : 1,10m, 1,30m et 1,50m, alors que pour le CHEVAL 4, nous l'avons supposé trop long, juste pour vérifier les limites possibles de la longueur et leurs effets sur l'écoulement de l'air.
2. Pour les géométries dites CHEVALENCOLURE 1, 2 et 3, qui sont respectivement données par les figures 13, 14 et 15, nous avons augmenté à chaque fois la largeur de l'encolure, par pas de 10 cm, par rapport à celle la plus fine (CHEVALENCOLURE 1).
3. Pour les géométries dites CHEVALLARGEUR 1, 2 et 3, qui sont respectivement, illustrées par les figures 16, 17 et 18, nous avons augmenté à chaque fois la largeur du corps par pas de 10 cm aussi.

Résultats et discussions

7. Résultats et discussions

Après avoir introduit les géométries dans le logiciel, et avoir bien défini les conditions du calcul, nous avons pu déterminer les valeurs de deux paramètres aérodynamiques, à savoir, la surface de référence S , ainsi que la force totale (ou de traînée) F .

Il faut noter que, les forces totales données par le *FLUENT* englobent les forces dues à la pression atmosphérique, et qui sont les résultantes de la variation de la vitesse de l'écoulement de l'air autour de l'obstacle, et les forces dues à la viscosité du fluide.

Le tableau 03, donne les valeurs de la surface de référence des différentes géométries choisies.

Tableau 03: Valeurs des surfaces de référence pour chaque géométrie.

<i>Géométrie</i>	<i>Surface de référence (m²)</i>
CHEVAL 1	1,8160
CHEVAL 2	1,9215
CHEVAL 3	2,0271
CHEVAL 4	2,1231
CHEVALENCOLURE 1	1,5460
CHEVALENCOLURE 2	1,5615
CHEVALENCOLURE 3	1,6121
CHEVALLARGEUR 1	1,7914
CHEVALLARGEUR 2	1,8093
CHEVALLARGEUR 3	1,8294

On remarque à partir du tableau, pour chaque type de géométries, que la surface de référence accroît. Or ces valeurs de la surface de référence, sont ensuite prises en considération par le logiciel pour en calculer les valeurs de la force de traînée.

Les tableaux 04, 05 et 06, représentent les valeurs de la force totale, données en considérant les valeurs de la vitesse d'écoulement de l'air imposées précédemment, pour les différentes géométries.

Tableau 04 : valeurs des forces totales appliquées sur les géométries: CHEVAL 1, 2, 3 et 4.

Vitesse imposée (km/h)	Force Totale (Newton)			
	CHEVAL 1	CHEVAL 2	CHEVAL 3	CHEVAL 4
20	12,7736	14,1821	14,0328	13,6818
30	27,7968	30,6658	30,0484	29,0645
40	48,6816	53,6244	52,2	50,2139
50	75,5617	82,9689	80,4003	77,0307
60	108,4099	118,7603	114,6991	109,5109
70	147,0887	161,0402	155,0854	147,6743

Tableau 05 : valeurs des forces appliquées sur les géométries: CHEVALENCOLURE 1, 2, 3.

Vitesses imposées (km/h)	Force totale (Newton)		
	CHEVALENCOLURE 1	CHEVALENCOLURE 2	CHEVALENCOLURE3
20	7,9588	8,4486	8,027
30	17,1171	18,1688	17,4324
40	29,4652	31,21	30,0444
50	44,9625	47,6035	45,9905
60	63,769	67,4498	65,2749
70	85,7683	90,7238	88,0536

Tableau 06 : valeurs des forces appliquées sur les modèles: CHEVALLARGEUR 1, 2 et 3

Vitesses imposées (km/h)	Valeurs des forces (Newton)		
	CHEVALLARGEUR 1	CHEVALLARGEUR 2	CHEVALLARGEUR 3
20	10,273	9,3705	8,6081
30	22,0328	19,9111	18,0292
40	38,2345	34,4391	30,9458
50	58,9761	53,0105	47,2765
60	84,2182	75,6066	67,0257
70	113,9988	102,0598	90,1823

Les variations de la force totale, qu'exerce l'air sur les différentes géométries de l'étude, en fonction de la vitesse de l'air sont données par les figures 19, 20 et 21.

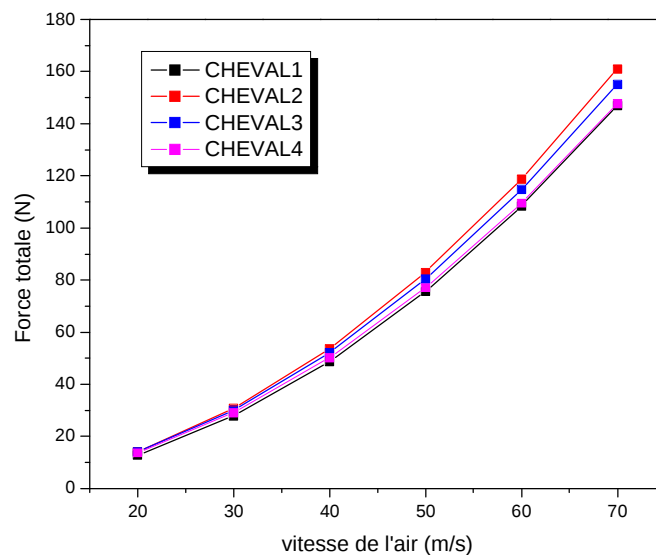


Figure 19 : evolution de la force totale en fonction de la vitesse de l'air pour les géométries dites: CHEVAL 1, 2, 3 et 4

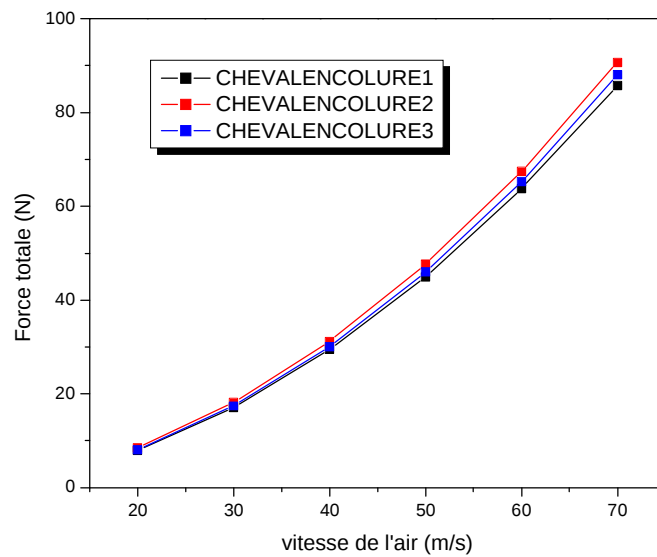


Figure 20 : evolution de la force totale en fonction de la vitesse de l'air pour les géométries dites:
CHEVALENCOLURE 1, 2 et 3

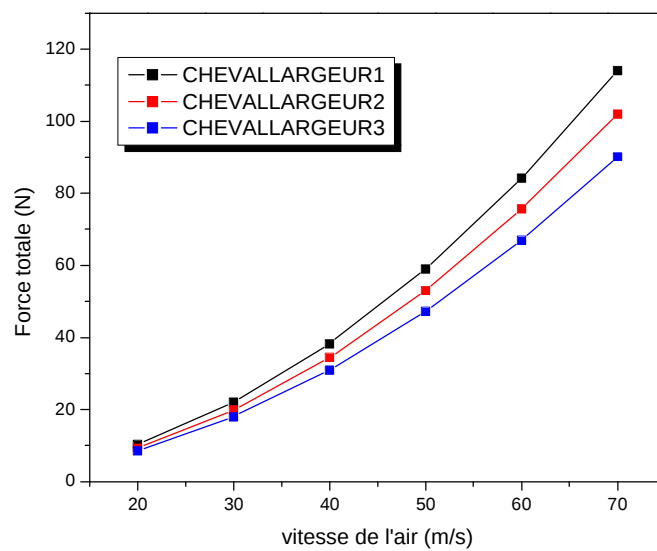


Figure 21 : evolution de la force totale en fonction de la vitesse de l'air pour les géométries dites:
CHEVALLARGEUR 1, 2 et 3

D'après ces figures, on constate que lorsque la vitesse augmente la force totale augmente, ce qui est en conformité avec la formule 3.I de la force. De plus on remarque qu'à faibles vitesses ($v < 20$ km/h), les courbes de variation sont confondues mais au fur et à mesure que la vitesse augmente, les courbes s'éloignent significativement les unes des autres.

De plus, on note que l'ordre de grandeur des forces totales enregistrées change d'une géométrie à l'autre. En effet, pour les géométries CHEVAL 1, 2, 3 et 4, on remarque que la force totale est moins importante dans le cas des CHEVAL 1 et 4. Ceci n'est pas en conformité avec la loi reliant la surface avec la force (formule (3.I)). Ça nous a permis de dire qu'il existe, pour ces deux géométries, un rapport longueur/largeur les rendant plus aérodynamiques par rapport aux autres, c'est-à-dire qu'elles pénètrent plus facilement dans l'air et par conséquent, elles sont plus performantes.

Le même raisonnement s'applique pour les autres séries. Pour les géométries CHEVALENCOLURE 1, 2 et 3, on trouve que le CHEVALENCOLURE 1 est le plus aérodynamique, alors que CHEVALENCOLURE 3, ayant la plus large encolure, est plus aérodynamique que celui d'une largeur d'encolure moyenne. Pour les géométries CHEVALLARGEUR 1, 2 et 3, la géométrie CHEVALLARGEUR 3, celle la plus large est la plus aérodynamique, qui oppose franchement la loi de la force.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans l'étude entreprise, nous avons tenté d'initier l'utilisation d'un logiciel de calcul numérique, destiné à l'étude des écoulements des fluides autour d'un obstacle.

Pour cela, nous avons introduit quelques notions de base concernant la dynamique des fluides sur lesquelles repose le code de calcul, largement utilisé dans l'industrie aérodynamique, automobile et dans les laboratoires de recherche, c'est le *FLUENT*.

L'emploi de cet outil informatique, nous a permis de simuler l'écoulement de l'air autour de plusieurs profils bidimensionnels chevalins, qui sont le CHEVAL 1, 2, 3 et 4, le CHAVALENCOLURE 1, 2, 3 et le CHEVALLARGEUR 1, 2, 3, classés par rapport aux paramètres mis en jeu, qui sont respectivement, la longueur, la largeur de l'encolure et la largeur. Ceci nous a conduit d'une part, à mettre en évidence l'apport du logiciel de calcul dans la simulation de la conformation, et d'autre part, de pouvoir faire une étude comparative.

L'application de ce code de calcul nous a permis d'en tirer les différents paramètres aérodynamiques à savoir ; la surface de référence et la force totale ou de traînée. A partir de cette dernière, nous avons pu déterminer du point de vue aérodynamique les morphologies les plus performantes.

Références bibliographiques

BOUNEKHLA F., NOVEMBRE 2005 : le monde hippique, N.46, SCHPM, 60 pages 18 et 19.

ELWIN HARTLEY EDWARDS, 1992 : Les chevaux. Ed. SOLAR. Paris.240 pages 14, 15, 16, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 42, 43, 228 et 229.

IDEL'CIK (I.E.), 1986 : *Mémento des pertes de charge*. Eyrolles, 200 page119.

LEFEBVRE (J.), 1985 : *Mesure des débits et des vitesses des fluides*. Masson, 300 pages 55.

MIDOUX (N.) ,1988 : Mécanique et Rhéologie des fluides en Génie Chimique. Lavoisier Paris, 356 pages 145.

MIDOUX (N.), 1985 : *Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique*. Tec. et Doc. Lavoisier, 147 pages 15.

NOUGIER J. P., 1991 : Méthodes de calcul numérique, 3^{ème} édition, 401 page 245.

SCHIESTEL (R.), 1993 : *Modélisation et simulation des écoulements turbulents*. Hermès, 145 pages 12 et 185.

Résumé:

Depuis quelques décennies, l'aérodynamique a subi un développement considérable, qui tient pour l'essentiel, aux progrès incessants effectués à la fois dans les domaines du calcul numérique et les techniques expérimentales. Dans ce mémoire, nous avons initié l'application d'un logiciel de calcul numérique, basé sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, destiné à la description et à la détermination de la meilleure conformation chevaline de point de vue aérodynamique.

Mots clés: aérodynamique, calcul numérique, profil chevalin, conformation aérodynamique.

Abstract :

Since some decades, aerodynamics underwent a considerable development which holds for the essential to the unceasing progress done at a time in the domains of the numeric calculation and the experimental techniques. In this memory, we initiated the application of a numeric calculation software, based on the resolution of the equations of the mechanics of the fluids, intended to the description and to the determination of the best horsy conformation of an aerodynamic point of view.

Key words: aerodynamics, numeric calculation, horsy profile, aerodynamic conformation.

.....