

Comparaison de différentes options de conception d'un parapente, étude de l'équilibre longitudinal.

Pierre Puisseux

le 24-08-99

Université de Pau et des Pays de l'Adour

email : pierre.puiseux@univ-pau.fr

1 Le logiciel Hippolyte, utilisation

1.1 Motivation et environnement

Cette comparaison s'appuie sur un logiciel de simulation numérique, *Hippolyte* écrit par la société Nervures. Ce logiciel effectue pour une configuration de parapente donnée, une simulation aérodynamique (2d ou 3d) dont les résultats sont exploités par une simulation de l'équilibre mécanique du parapente en *vol droit*.

Les simulateurs aérodynamiques calculent, pour différents angles d'incidences et de dérapage, les forces aérodynamiques s'exerçant sur la voilure (ou le profil, en 2d), dans l'hypothèse d'un fluide non visqueux (écoulements laminaires), isotherme et incompressible. Les deux dernières hypothèses sont très largement justifiées aux vitesses où vole le parapente. Pour l'hypothèse de l'écoulement laminaire on peut estimer à 10 % l'erreur commise dans les limites du vol ordinaire.

La simulation de l'équilibre mécanique consiste à résoudre les équations de la mécanique du solide à l'équilibre (somme des forces et des moments s'exerçant sur le solide=0).

Les options de conception envisagées ici concernent la forme du profil, la forme en plan, la forme de la voûte (ou lobe), l'influence d'un profil variable en envergure, la longueur du cône de suspentage, le poids du pilote.

Quelques définitions :

- Centrage : c'est la position du centre de poussée, en % de corde centrale.
- Calage c'est en % de corde, la position de la projection orthogonale du pilote sur la corde. En 3d, la corde de référence est la corde centrale de la voile.
- Lobe
- Voûte

1.2 Paramètres et résultats des simulations

Le programme *Hippolyte* permet de travailler par session. Une session consiste en l'exécution du programme pour (une ou) plusieurs configurations à comparer. La session porte un nom, disons "Booxtor", et *Hippolyte* crée un répertoire "Booxtor" dans lequel se trouvent tous les fichiers qu'il génère.

Le fichier d'entrée de la session est "Booxtor.eq1". Il est recopié dans le répertoire de la session. "Booxtor.eq1" est un fichier de *paramètres* à disposition de l'utilisateur et comporte une description de l'ensemble des configurations à simuler pour cette session.

1 Le logiciel Hippolyte, utilisation

En sortie, *Hippolyte* fournit un certain nombre de fichiers situés eux aussi dans le répertoire "Booxtor". A partir de ces résultats bruts, on extrait des *descripteurs* du comportement, ainsi que des graphiques de comparaison des différentes configurations simulées.

1.2.1 Paramètres de la session, valeurs par défaut

Les paramètres à disposition de l'utilisateur sont rassemblés dans un fichier propre à chaque session. Voici les *valeurs par défaut*, définies dans le fichier hippolyte.ini et commentées plus loin :

```
* Fichier d'initialisation pour Hippolyte :
*valeurs par défaut
G                               9.81
RHO                             1.112
OSWALD                          0.8
ITMAX                           100
CXOA                             0.03
FORMAT DE SORTIE                Netscape
REPertoire DESCRO VOILE         /home/simulations/voiles/
SURFACE DE REFERENCE           28
NOM DU PILOTE                  Pierre
MASSE DU PILOTE                100
SCX DU PILOTE                   0.5
QI DU PILOTE                    100
LONGUEUR DU SUSPENTAGE         7.0
SCX DU SUSPENTAGE              0.5
DIAMETRE DES SUSPENTES        1.3
NOM DE LA VOILE                BOOXTOR
MASSE DE LA VOILE              5
ALLONGEMENT                     5.4
SURFACE DE LA VOILE            28
AVANT DES OUVERTURES           1.1
ARRIERE DES OUVERTURES        2.2
CALAGE MINI                     0
CALAGE MAXI                    100
DELTA CALAGE                    1
```

OSWALD est le coefficient d'efficacité d'Oswald. Il est utilisé en 2d pour le calcul de la traînée induite à partir de l'allongement. Il est inutilisé en 3d.

CX0A est le coefficient de traînée irréductible de la voilure (hors traînée induite). Il est supposé constant et ne dépend que de la forme de la voile. Utilisé en 2d et 3d.

1.3 Les descripteurs de comportement proposés

G	accélération de la pesanteur.
RHO	masse volumique de l'air par défaut .
REPertoire D'ENTREE	le répertoire dans lequel se trouvent les coordonnées du profil (2d) ou la description de la voile (fichier.cmi) en 3d.
FICHIER D'ENTREE	le nom du fichier coordonnées du profil ou .cmi.
SURFACE DE REFERENCE	inutile
CALAGE MAXI , DELTA CALAGE et CALAGE MINI	les calculs se feront pour des calages variant de 'calage min' à 'calage max', par pas de 'delta calage'. Pour chaque calage seront calculés les caractéristiques du parapente (vitesse, incidence, centre de poussée, taux de chute, finesse, ...)
NOM DU PILOTE	inutile
MASSE DU PILOTE	pois total en vol
SCX DU PILOTE	Varie de 0.19 à 0.53 (cf [?])
QI DU PILOTE	indispensable, >40
LONGUEUR DU SUSPENTAGE	
SCX DU SUSPENTAGE	
NOM DE LA VOILE	pour les légendes des sorties graphiques
SURFACE DE LA VOILE	utilisé seulement en 2d. En 3d, elle est calculée.
ALLONGEMENT DE LA VOILE	pour le 2d seulement et le calcul de la traînée induite.
MASSE DE LA VOILE	
AVANT DE L'OUVERTURE	position de l'avant de l'ouverture en % de corde
ARRIERE DE L'OUVERTURE	position de l'arrière de l'ouverture en % de corde

1.3 Les descripteurs de comportement proposés

Les résultats de la simulation sont exprimés par différents descripteurs. Tous les descripteurs sont envisagés comme des fonctions du calage.

En première approximation, on estime que le calage est modifié à l'aide de l'accélérateur, ainsi, une variation négative de calage correspond au pilote qui accélère.

Nous avons considéré que les variations d'incidence correspondent soit à une atmosphère turbulente, soit à une entrée ou une sortie de thermique.

1 Le logiciel Hippolyte, utilisation

Des variations de la vitesse sont également caractéristiques d'une aérologie turbulente ; on en tiendra compte pour l'interprétation des indicateurs de comportements décrits ci-dessous.

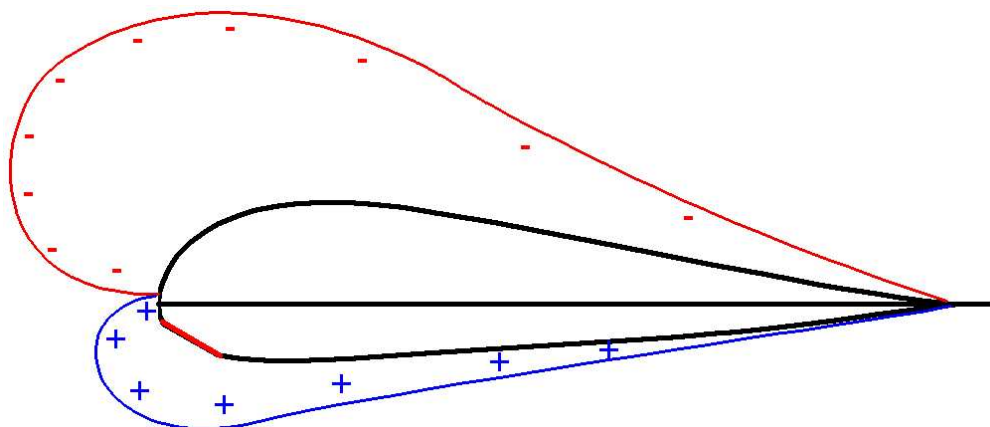
Les descripteurs (ou indicateurs) retenus comme significatifs du comportement d'un parapente sont la vitesse, la position du centre de poussée, la finesse, la taux de chute et l'incidence, ainsi que diverses quantités dérivant des précédentes.

1.3.1 Descripteurs liés à la vitesse V

La vitesse et la plage de vitesse, vitesse max et vitesse min. sont bien entendus des descripteurs importants du parapente.

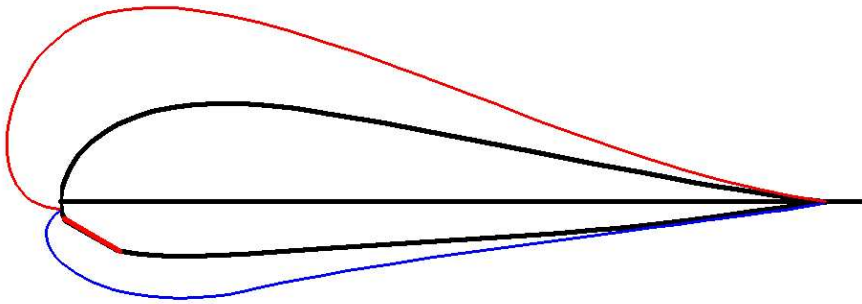
La vitesse maximum, fermeture frontale

La vitesse maximum du parapente correspond à l'apparition de la fermeture frontale. Dans ce travail, nous avons fait l'analyse suivante : à forte incidence, toute la partie avant de l'intrados est en surpression. Lorsque l'incidence diminue, arrive le moment où l'intrados, dans sa partie avant est le siège d'une petite dépression. Au fur et à mesure que l'incidence diminue, cette dépression augmente et se rapproche des ouvertures. On estime que la fermeture intervient lorsque cette dépression atteint les ouvertures. A ce moment, il y a aspiration de l'air contenu dans la voilure, puis fermeture frontale. Certaines voiles (FreeX en particulier) présentent un autre type de fermetures frontales : la dépression d'intrados devient massive avant d'avoir atteint les ouvertures, et dans ce cas, la fermeture est plus rare, mais plus massive, sans la phase de vidage de la voilure.

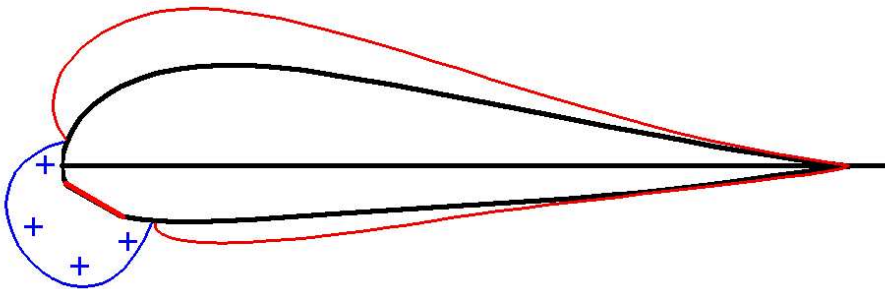


Incidence 8 degré , vol normal; dépression extrados, surpression intrados.

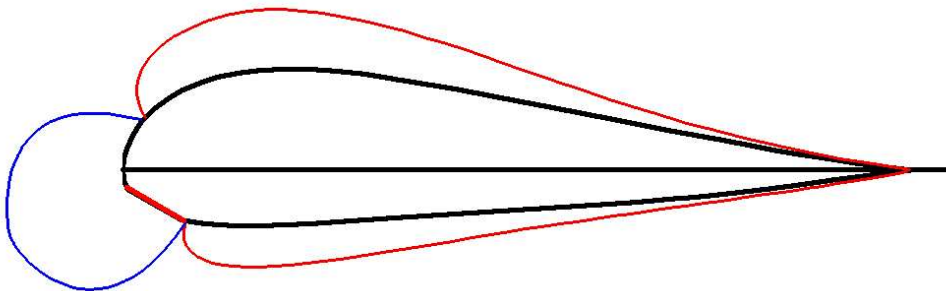
1.3 Les descripteurs de comportement proposés



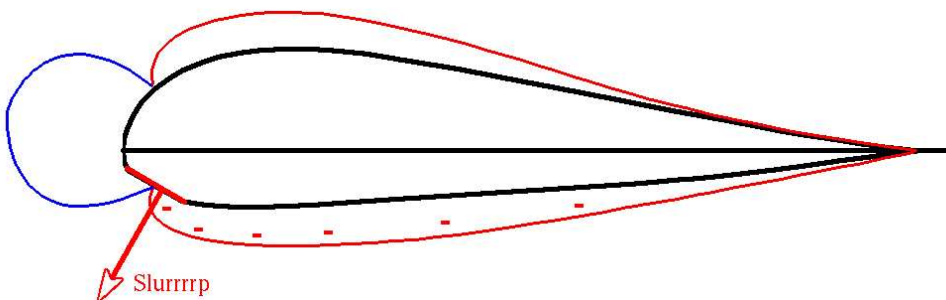
Incidence 5 degrés, vol normal; la surpression intrados s'affaiblit.



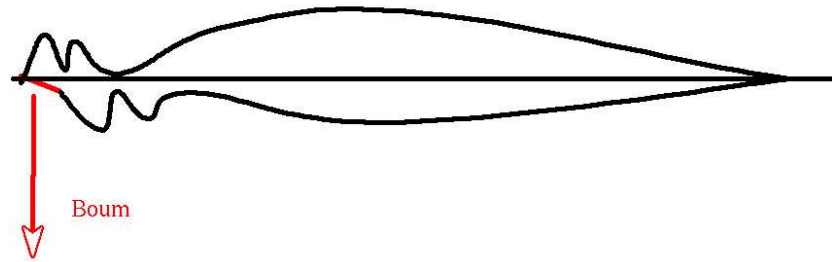
Incidence 4 degrés, l'intrados commence à passer en dépression, le point de transition s'approche des ouvertures.



Incidence 2 degrés, la dépression d'intrados s'approche des ouvertures, un révolin se forme au bord d'attaque.



Incidence 1degrés, la dépression est dans les ouvertures et aspire l'air contenu dans la voile, début de fermeture.



Fermeture.

Vitesse minimum, décrochage.

On admet que la vitesse minimale d'un parapente est celle obtenue lorsque la voile commence à décrocher.

Cette limite est donnée pour un profil (2d), par une formule un peu magique que l'on trouve dans [McCormick] pour les profils NACA à quatre chiffres et pour un nombre de Reynolds $\Re = 8 \times 10^6$

$$C_{zmax} = 1.67 + 7.8pz - 2.6 \frac{(0.123 + 0.022p - 0.5z - t)^2}{t^{3/2}} \quad (1.1)$$

dans cette équation, t est l'épaisseur relative du profil, z et p la cambrure maximum et sa position exprimés en fraction de corde. Malheureusement, on ne dispose pas, à notre connaissance de formule prenant en compte le rayon de bord d'attaque, dont on sait qu'il est déterminant pour l'incidence maximum.

En 3 dimensions, le programme utilisé effectue le calcul des lignes de courant et une analyse de la couche limite sur ces lignes de courant. On estime que l'incidence maximum (correspondant à la vitesse minimum) est atteinte lorsque la couche limite est turbulente et décroche. Si la couche limite est laminaire, elle raccroche en général en couche limite turbulente un peu plus loin sur le profil.

La plage de vitesse $\Delta V = V_{max} - V_{min}$

Bien sûr, plus elle est étendue, plus le parapente est tolérant aux conditions aérologiques. L'obtention de bonnes plages de vitesse est un challenge pour l'avenir. Les plages de vitesses des parapentes actuels sont de l'ordre de 20 à 25 km/h.

Aptitude à entrer en thermique : variation de vitesse avec l'incidence : $\frac{dV}{d\alpha}$.

Donne une indication sur les comportements d'une voile en entrée de thermique.

Si $\frac{dV}{d\alpha} < 0$ la voile ralentit en entrée de thermique, c'est la caractéristique d'une voile qui refuse le thermique, elle accélère en cas contraire.

1.3 Les descripteurs de comportement proposés

Efficacité de l'accélérateur : variation de vitesse avec le calage : $\frac{dV}{d\sigma}$.

Caractérise l'*efficacité* d'un accélérateur. Si $\frac{dV}{d\sigma}$ est grand, une variation de calage $d\sigma$ produit une grande variation dV de vitesse, l'accélérateur sera dit *efficace*

1.3.2 Descripteurs liés à l'incidence α

N'est pas à proprement parler un indicateur de comportement du parapente, mais elle permet néanmoins certaine vérification grossières sur la cohérence des résultats fournis par le programme.

1.3.3 Descripteurs liés au centre de poussée CP

Un centre de poussée qui bouge peu dans le sens de la corde est le garant d'une bonne stabilité en tangage.

Stbilité tangage : variation du centre de poussée avec l'incidence : $\frac{dCP}{d\alpha}$.

Permet de quantifier la stabilité et le confort du parapente en tangage et en atmosphère turbulente.

Si $\frac{dCP}{d\alpha}$ est grand, les variations du centre de poussée sont importantes en turbulence.

De plus, si le centre de poussée avance sur une augmentation d'incidence, c'est le signe d'une voile paresseuse en entrée de thermique, puisqu'alors la voile doit reculer au dessus de la tête du pilote pour retrouver l'équilibre. (à corrélérer avec $\frac{dV}{d\alpha}$)

1.3.4 Descripteurs liés à la finesse f

C'est la caractéristique qui fait le plus frémir les parapentistes en général. Les variations de finesse en fonction du calage, de l'incidence et de la vitesse sont également de bons descripteurs de comportement.

La finesse potentielle maximum.

La *finesse potentielle maximum* d'un parapente : la finesse du parapente complet est une fonction du C_z :

$$f(C_z) = \frac{C_z}{C_{x0T} + C_z/\pi\lambda}$$

où C_{x0T} est la somme des coefficients de traînée de la voile, du pilote et du suspentage et λ est l'allongement. Le maximum de cette fonction f est atteint pour $C_z = \sqrt{\pi\lambda C_{x0T}}$ et la finesse maximum que peut atteindre le parapente est

$$f_{max} = \sqrt{\frac{\pi\lambda}{4C_{x0T}}} \quad (1.2)$$

Cette finesse est la finesse maximum potentielle pour un parapente à C_{x0T} et allongement donnés. Cette finesse correspond à une valeur de calage unique, σ_0 et ne sera accessible

1 Le logiciel Hippolyte, utilisation

en vol qu'à condition que $\sigma = \sigma_0$. Il semble qu'en général ce calage soit très au-delà des valeurs compatibles avec la sécurité (décrochage aérodynamique) et que plus un parapente est calé à plat (σ grand), plus sa finesse bras hauts est importante.

Finesse réelle : variation de finesse en réponse à une variation d'incidence : $\frac{df}{d\alpha}$.

Permet de quantifier, pour un calage donné, la performance en *finesse réelle* d'une voile dans une atmosphère turbulente.

Si $\frac{df}{d\alpha}$ est grand les variations de finesse instantanées sont importantes. L'interprétation de cet indicateur est laissée à la discrétion du lecteur.

Performance de l'accélérateur : variation de finesse en réponse à une variation de calage: $\frac{df}{d\sigma}$.

Permet de quantifier, comme l'indicateur suivant, la *performance* d'un accélérateur.

Si $\frac{df}{d\sigma}$ est grand, la finesse se dégrade avec la variation de calage (prise de vitesse à l'accélérateur), l'accélérateur n'est pas performant.

Dans l'hypothèse où l'accélérateur ne fait que modifier le calage de la voilure, il peut être souhaitable pour la performance d'un parapente, que la finesse ne soit pas trop dégradée par une diminution du calage (=accélération). On peut au contraire désirer une dégradation importante de la finesse pour accéder à une descente rapide en accélérant.

Performance de l'accélérateur : variation de finesse avec la vitesse : $\frac{df}{dV}$.

Caractérise également la *performance* d'un accélérateur. Le prix à payer pour accélérer est une dégradation de la finesse : si $\frac{df}{dV}$ est grand, la finesse se dégrade avec la prise de vitesse, l'accélérateur n'est pas performant.

1.3.5 Descripteurs liés au taux de chute V_z

le taux de chute est un descripteur pertinent en soi.

2 Résultats

2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

2.1.1 Profils de la famille NACA 24XX

les deux derniers chiffres de la série naca à 4 chiffres donnent *l'épaisseur relative* du profil en pourcentage de corde. C'est donc ce paramètre que l'on étudie. Seule l'influence du profil est prise en compte, aussi la simulation aérodynamique 2d a-t-elle été utilisée. Voici le fichier naca24XX correspondant à cette session :

```
NOMBRE DE CONFIG          3

#je fais varier l'épaisseur max
CONFIG1
  FICHER D'ENTREE          naca2413.lis
  NOM DE LA VOILE          naca2413
CONFIG2
  FICHER D'ENTREE          naca2415.lis
  NOM DE LA VOILE          naca2415
CONFIG3
  FICHER D'ENTREE          naca2417.lis
  NOM DE LA VOILE          naca2417
END
```

On observe que la marge de calage est identique pour toutes les configurations, et que les caractéristiques varient peu d'une configuration à l'autre. La configuration la plus épaisse offre peut être un finesse légèrement meilleure aux calages rapides, mais ceci est à tempérer par le fait que la traînée irréductible (C_{x0a}) de la voilure la plus épaisse est légèrement supérieure à celle de la voilure la moins épaisse. Les finesses max potentielles sont identiques.

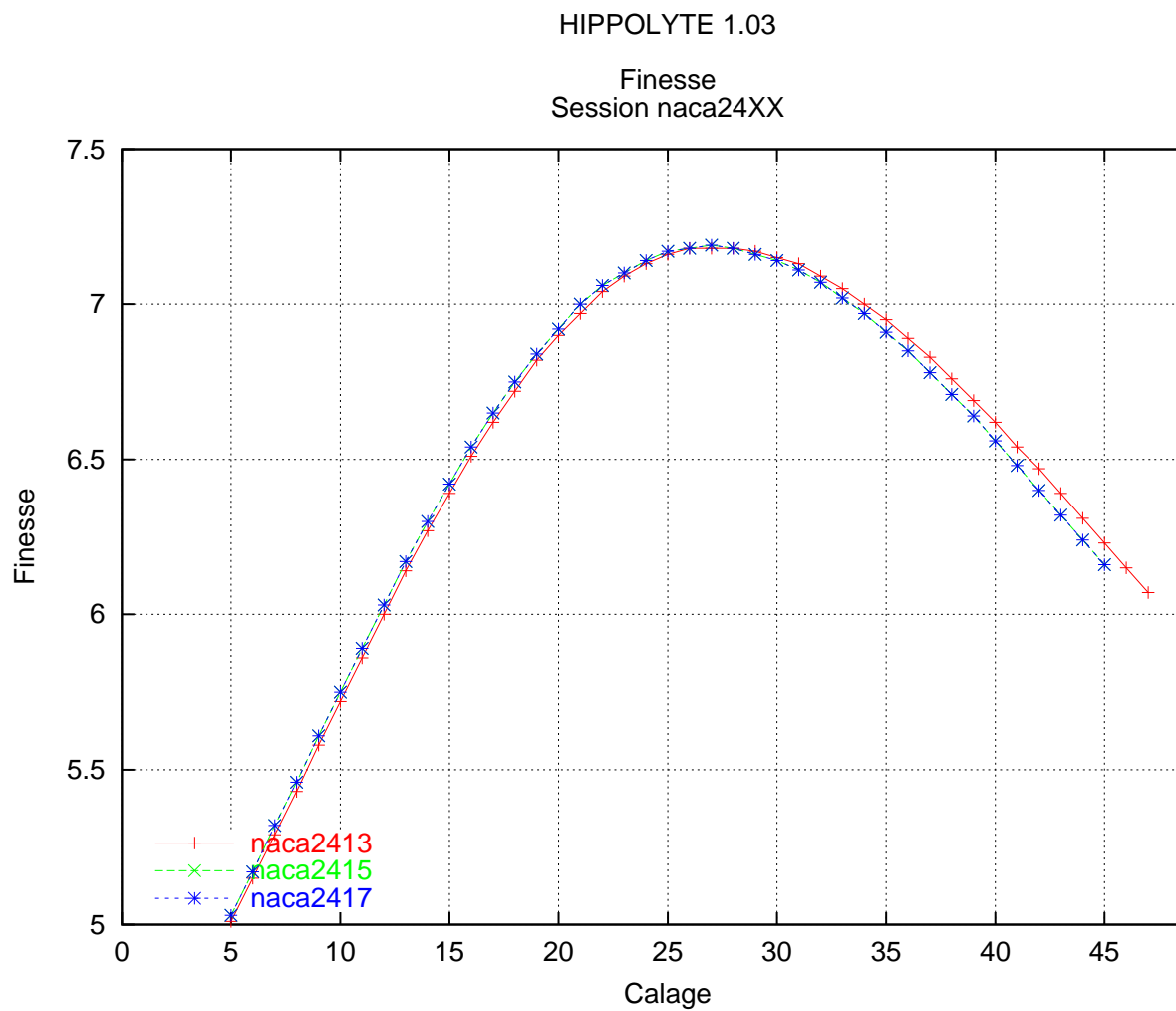
Les mêmes remarques : comportements analogues des trois configurations. La plage de vitesse en km/h est plus vaste que [23, 47], la fermeture intervient à 47 km/h. Le décrochage intervient en deçà de 23 km/h, à un calage de 50 % (la formule 1.1 donnant le C_{zmax} semble fantaisiste)

Tous les autres graphiques présentent les mêmes apparences (trois courbes quasiment superposées), il semble que l'épaisseur relative soit de peu d'importance pour ce qui concerne le comportement en vol du parapente. Cette conclusion est à tempérer par deux remarques :

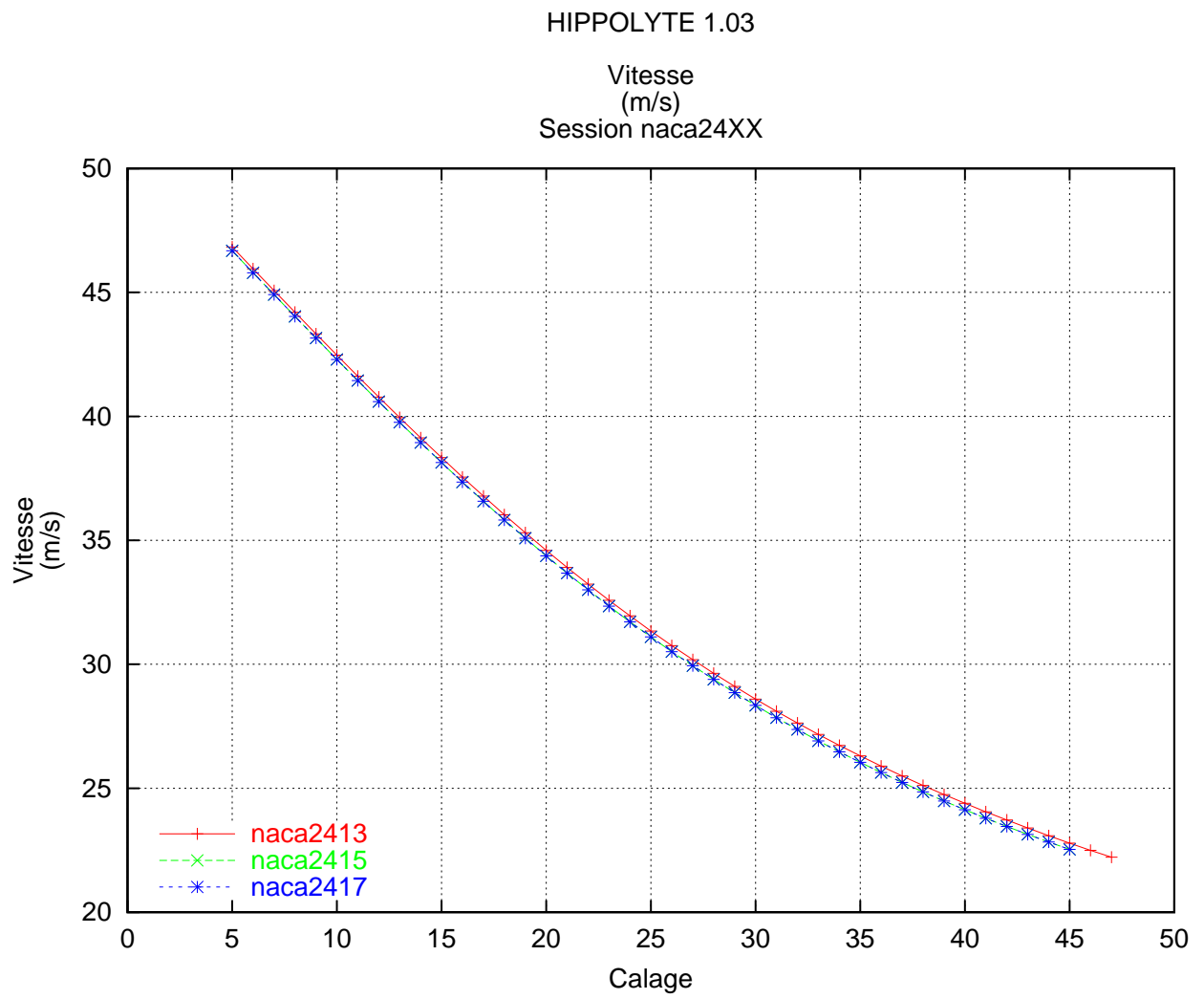
2 Résultats

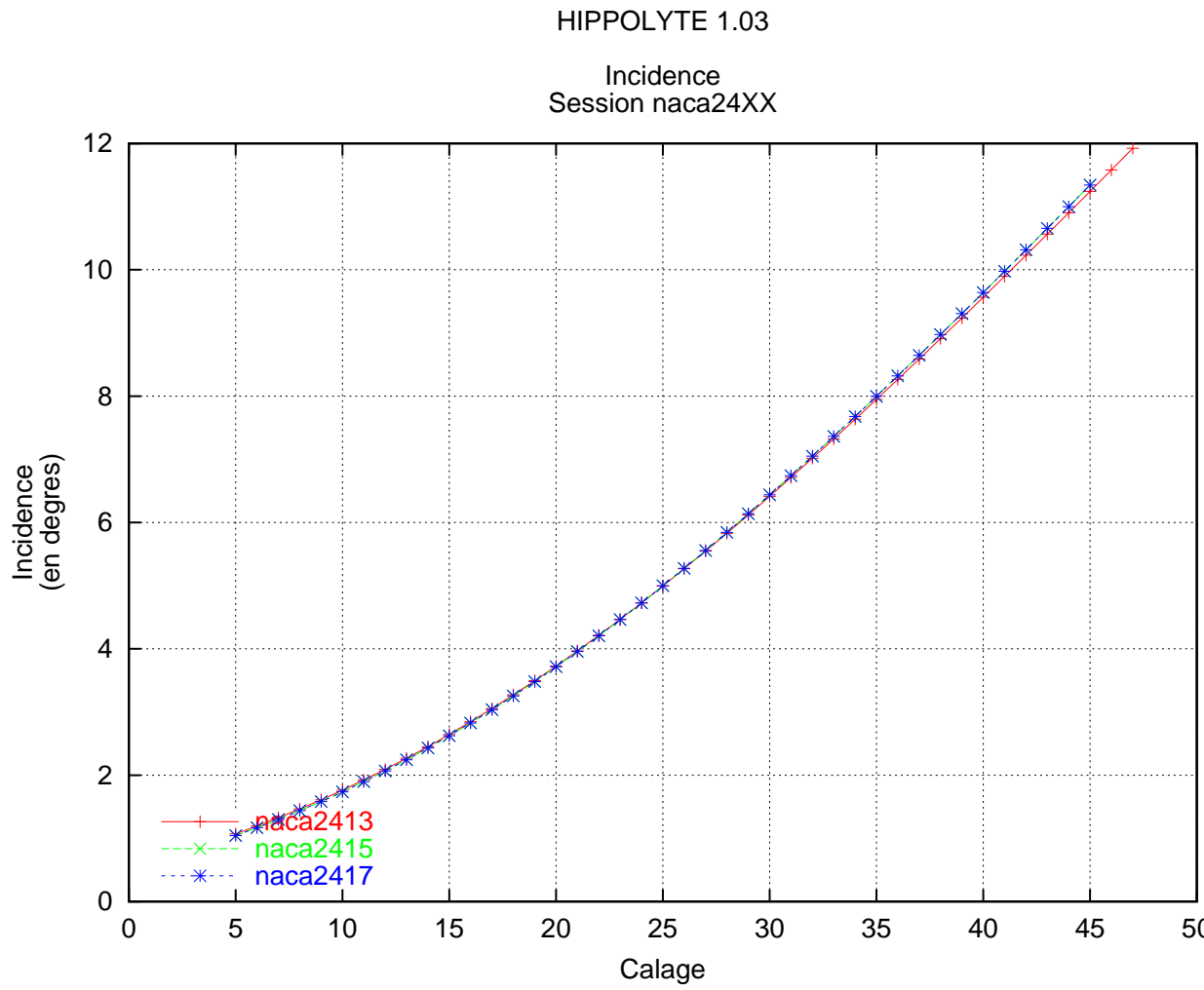
1. Le coefficient de traînée irréductible de l'aile (C_{x0a}) augmente lorsque l'épaisseur relative augmente, ce qui n'a pas été pris en compte ici faute de données pertinentes sur le sujet.
2. l'épaisseur relative du profil influence bien sûr la tenue et la rigidité de la voile, mais ceci sort du cadre de cette étude.

En conclusion, prendre des profils épais !

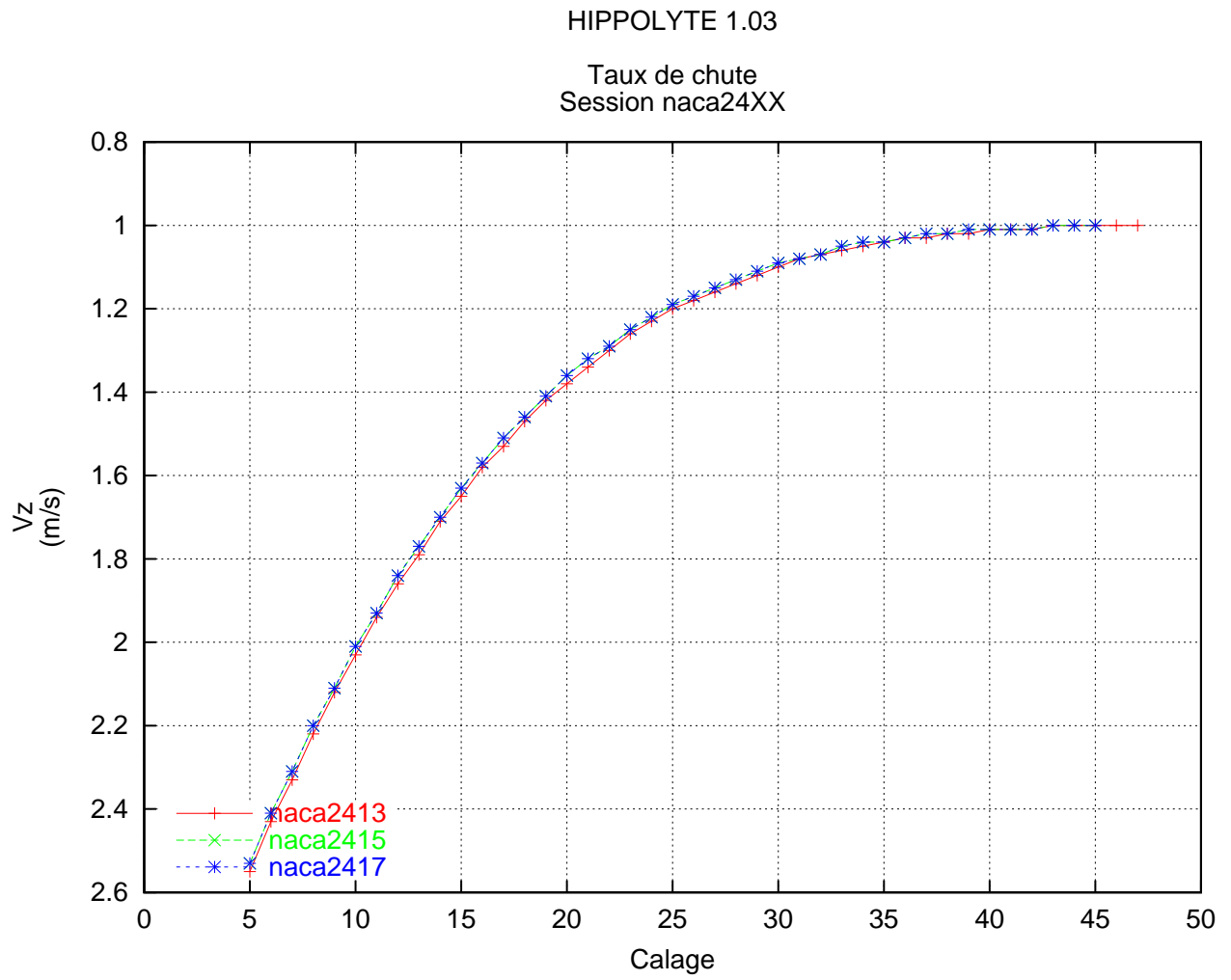


2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente



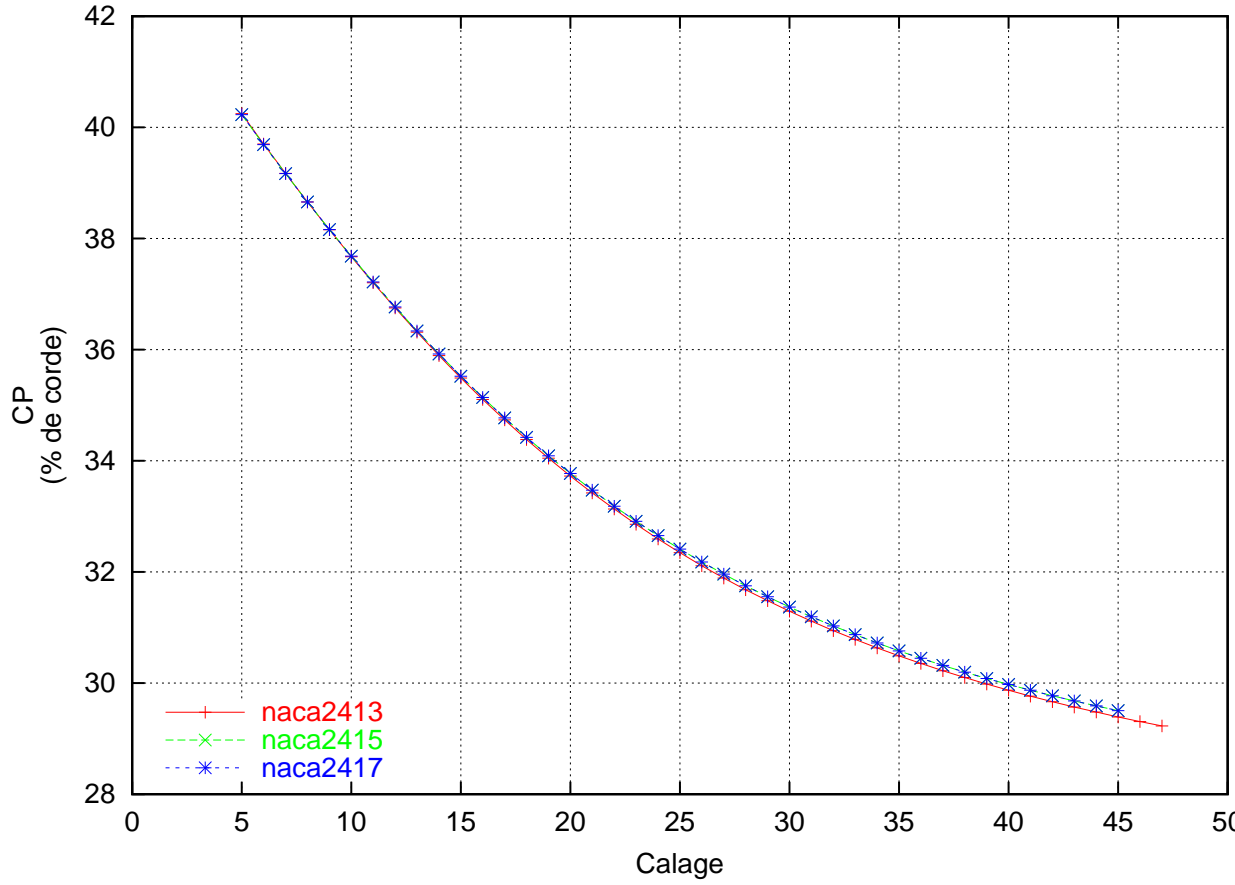


2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

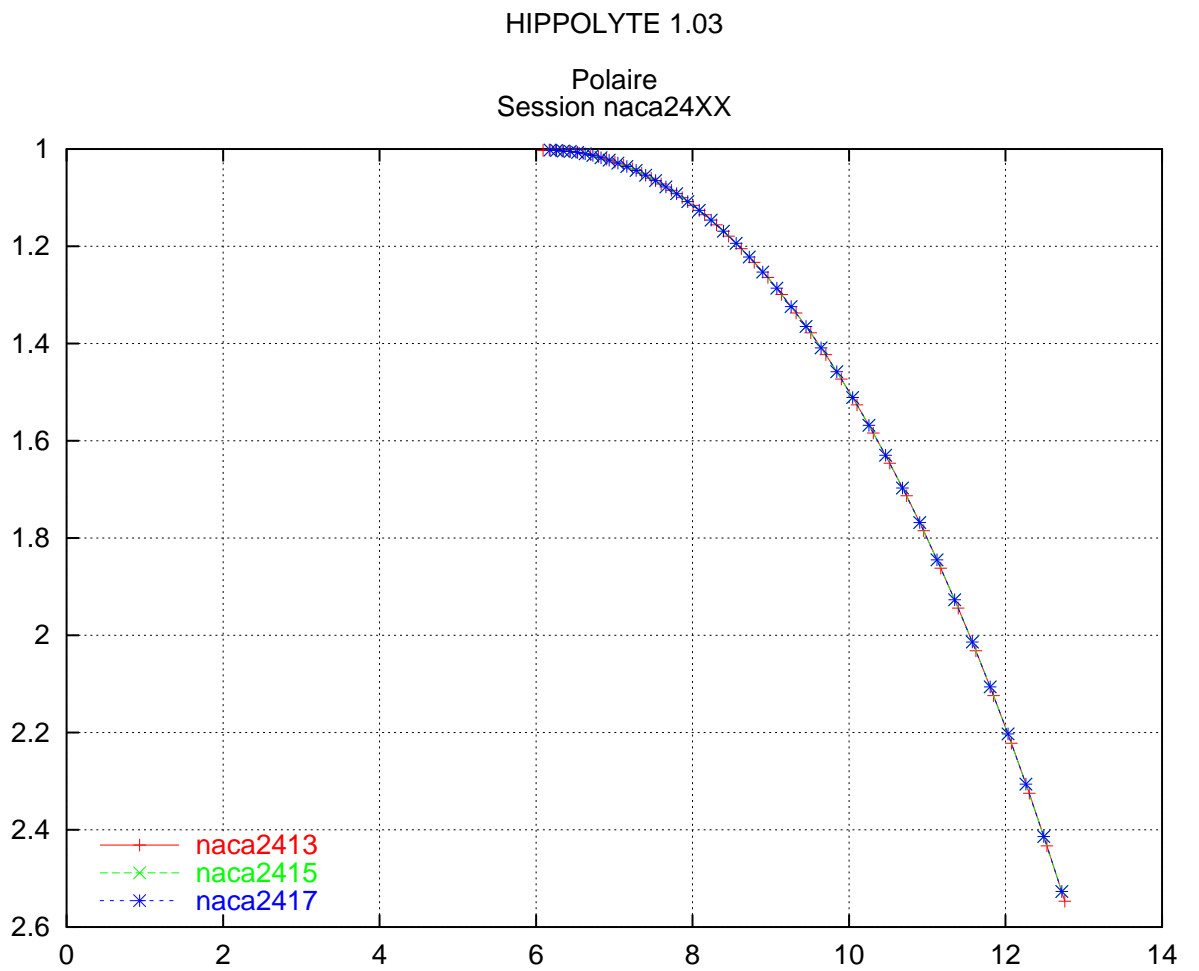


HIPPOLYTE 1.03

Position du centre de pousse
Session naca24XX

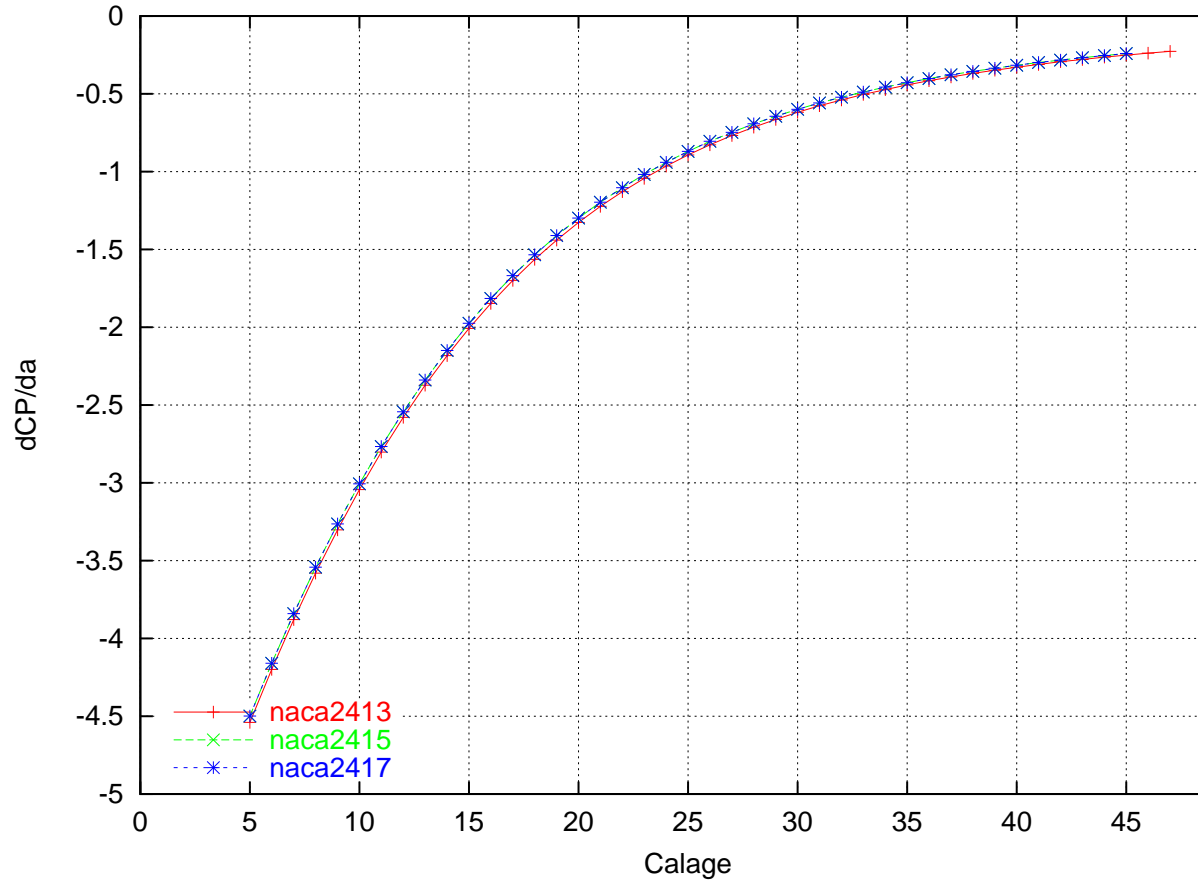


2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente



HIPPOLYTE 1.03

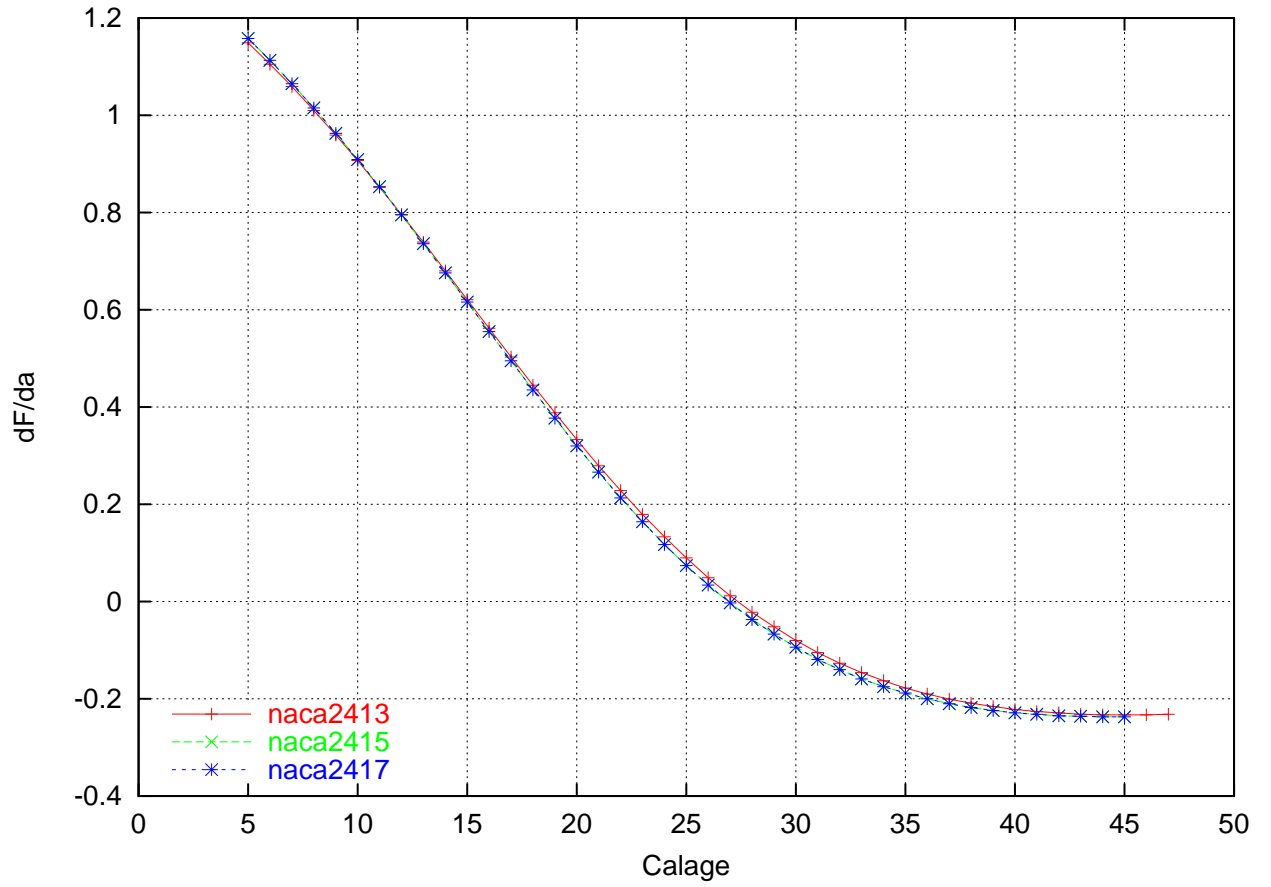
Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session naca24XX



2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

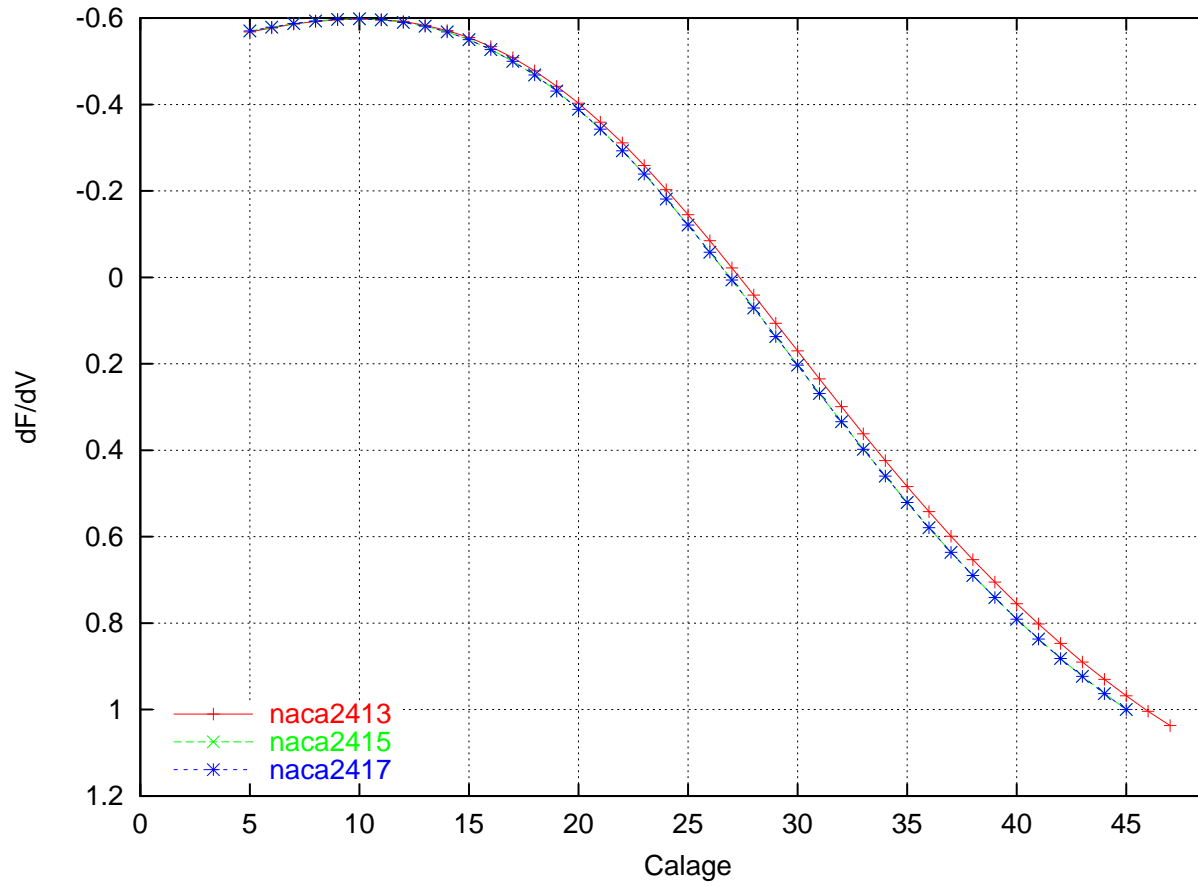
HIPPOLYTE 1.03

Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session naca24XX



HIPPOLYTE 1.03

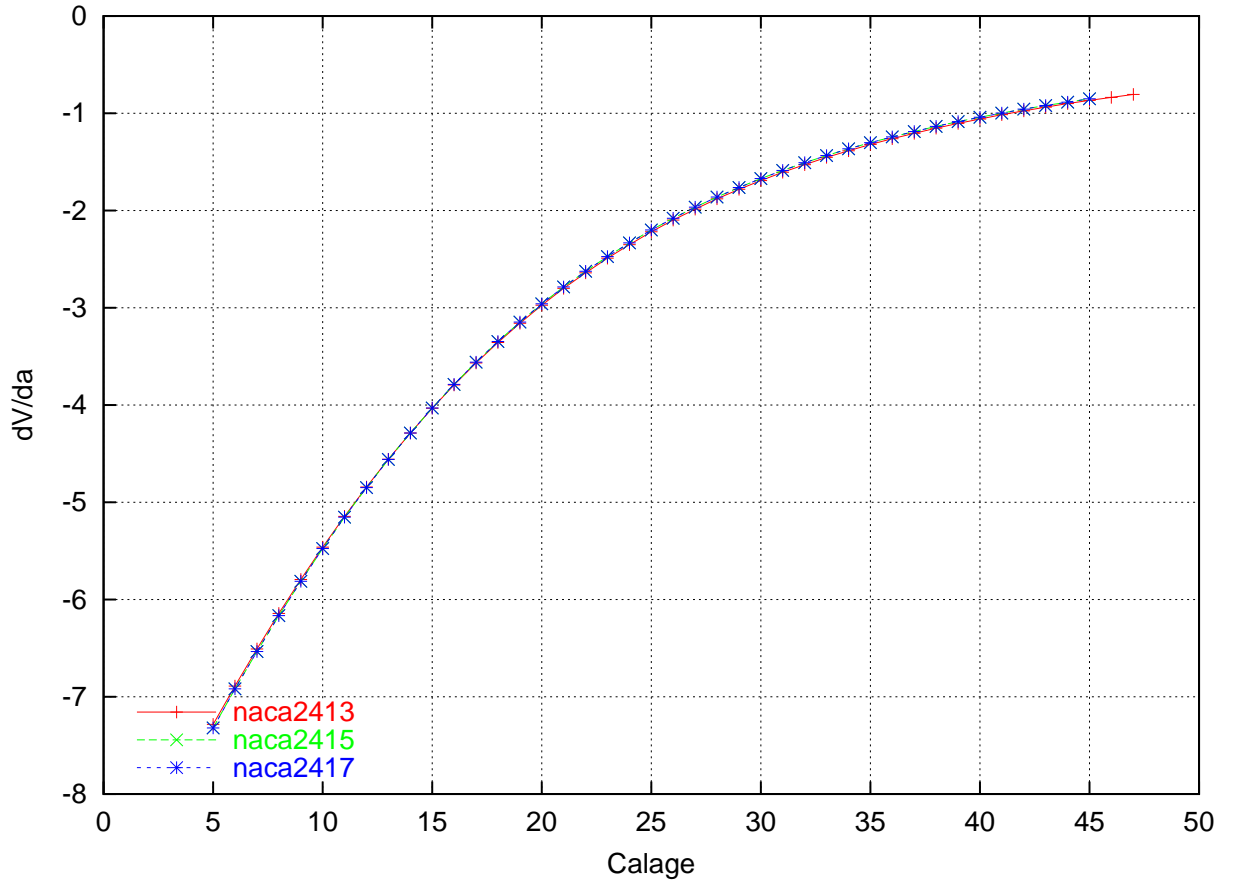
Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session naca24XX



2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session naca24XX



2.1.2 Profils de la famille NACA 2X15

Ici, on fait varier la position de la cambrure maximum. Le fichier naca2x15.eqi

NOMBRE DE CONFIG 3

#je fais varier la position de la cambrure max

CONFIG1

FICHER D'ENTREE naca2215.lis

NOM DE LA VOILE naca2215

CONFIG2

FICHER D'ENTREE naca2415.lis

NOM DE LA VOILE naca2415

CONFIG3

FICHER D'ENTREE naca2615.lis

2 Résultats

NOM DE LA VOILE naca2615
END

La plage de vitesse s'étend sur [23, 55]. On note sur ces courbes les points suivants :

1. la fermeture frontale intervient plus tôt sur les profils à creux reculé (config 3, frontale au calage 17%, config 1, frontale au calage 10%)
2. Si le creux est très reculé, (centrage très arrière), l'accélérateur est efficace, car la pente de la courbe des vitesses est forte.
3. Pour un creux moyennement reculé, l'accélérateur n'est pas plus efficace que pour un creux avancé (même pente des courbes de vitesses), par contre la voile est plus lente aux calages ordinaires.

En conclusion, si l'on veut une voile centrée arrière, on a intérêt à la centrer franchement en arrière, sous peine de ne plus pouvoir accéder aux hautes vitesses. La voile à centrage avant aura plus de marge de calage, accédera à des vitesses plus élevées, mais avec une efficacité moyenne de l'accélérateur.

On lit sur ce graphique que la voile centrée arrière, calée, disons à 20%, aura du mal à pénétrer dans le thermique car sa vitesse diminue fort en réponse à une variation d'incidence positive.

Imaginons une transition en atmosphère turbulente. De nombreuses variations d'incidence sont dues à des micro ascendances, suivies de micros descendances. Une voile centrée arrière rechigne à entrer dans la micro ascendance (l'incidence augmente, la vitesse diminue) mais par contre se précipite dans la descendance ! En moyenne, on peut supposer que la finesse réelle de la voile est bien inférieure à celle d'une voile centrée très avant.

Le profil à creux reculé, comme on le sait, est centré très en arrière (config 3), surtout aux faibles calages. De plus, les migrations du centre de poussée (en fonction du calage) sont importantes pour un creux reculé (naca2615, configuration3, pente forte).

Les migrations du centre de poussée en fonction de l'incidence sont, pour des calages usuels, bien plus importantes lorsque le creux est en arrière. Ces migrations deviennent même très importantes aux faibles incidences (donc aux hautes vitesses, là où le parapente est vulnérable).

Plus la voile est calée à piquer, plus elle est sujette à des migrations de centre de poussée (de l'ordre de 5% de migration pour 1° de variation d'incidence ou bien 1 radian ?)

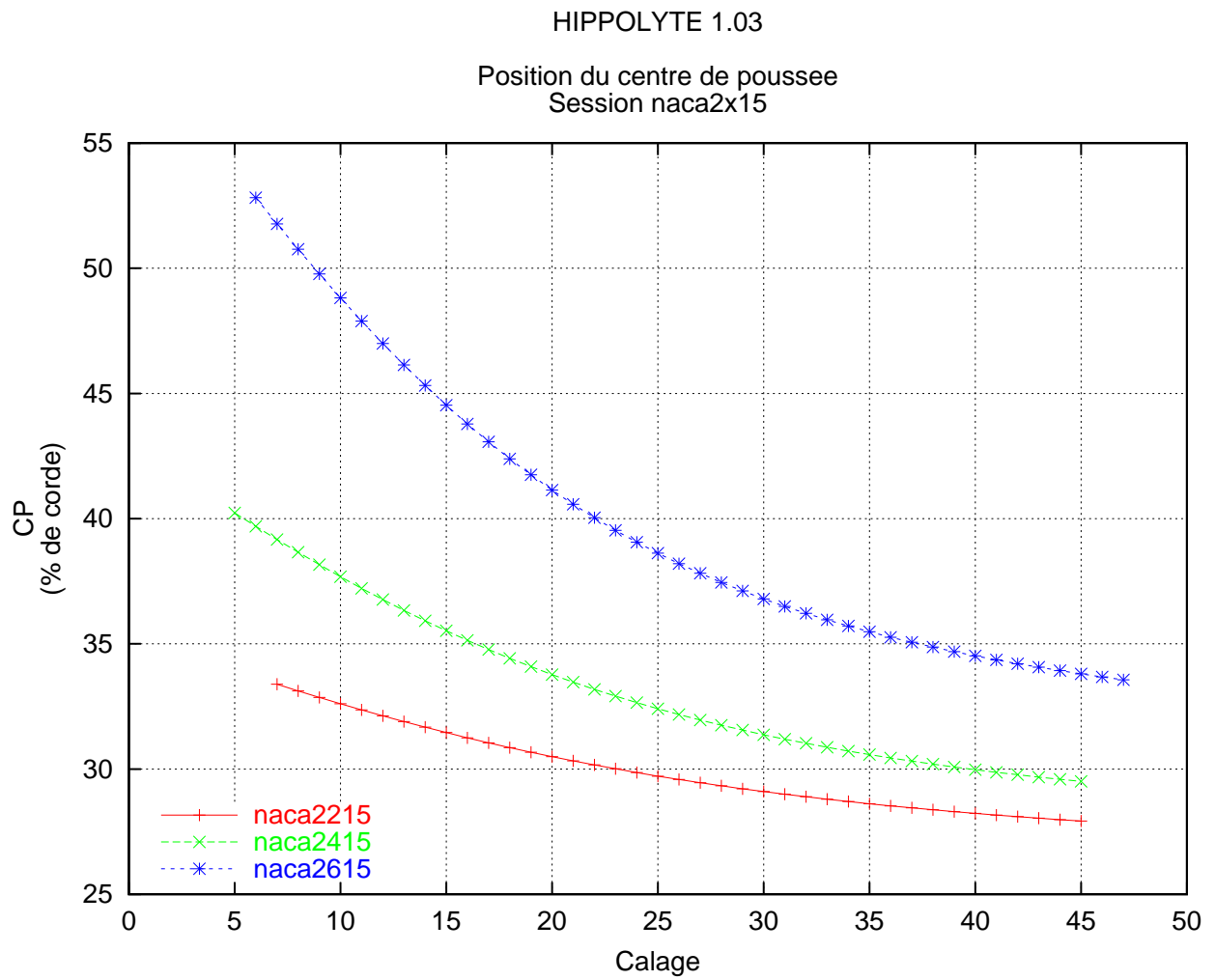
Les finesses max sont du même ordre de grandeur pour toutes les configurations (cf1.2). Pour le creux avant, le calage de finesse max est très à plat (38%). Pour le creux arrière, la finesse se dégrade vite lorsque l'on accélère (pente forte).

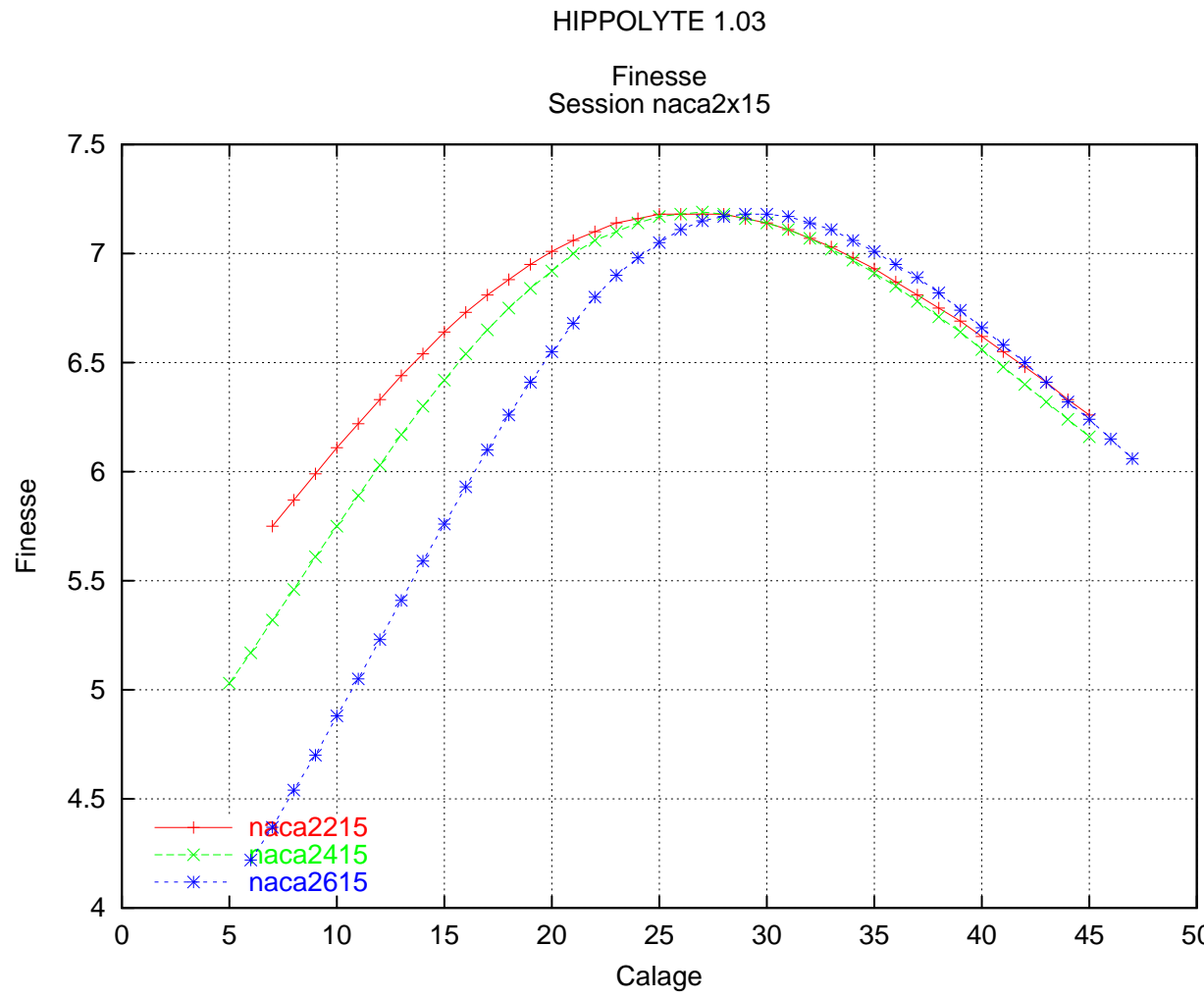
Hasard ? Toujours est-il que les valeurs usuelles de calage (20 à 30 %) correspondent à la dégradation maximum de la finesse.

En conclusion pour la position du creux : le creux avant est bien préférable au creux arrière, pour presque tous les aspects de la stabilité tangage, on le savait déjà, mais du point de vue de la performance, le creux avant semble également préférable, à ceci près

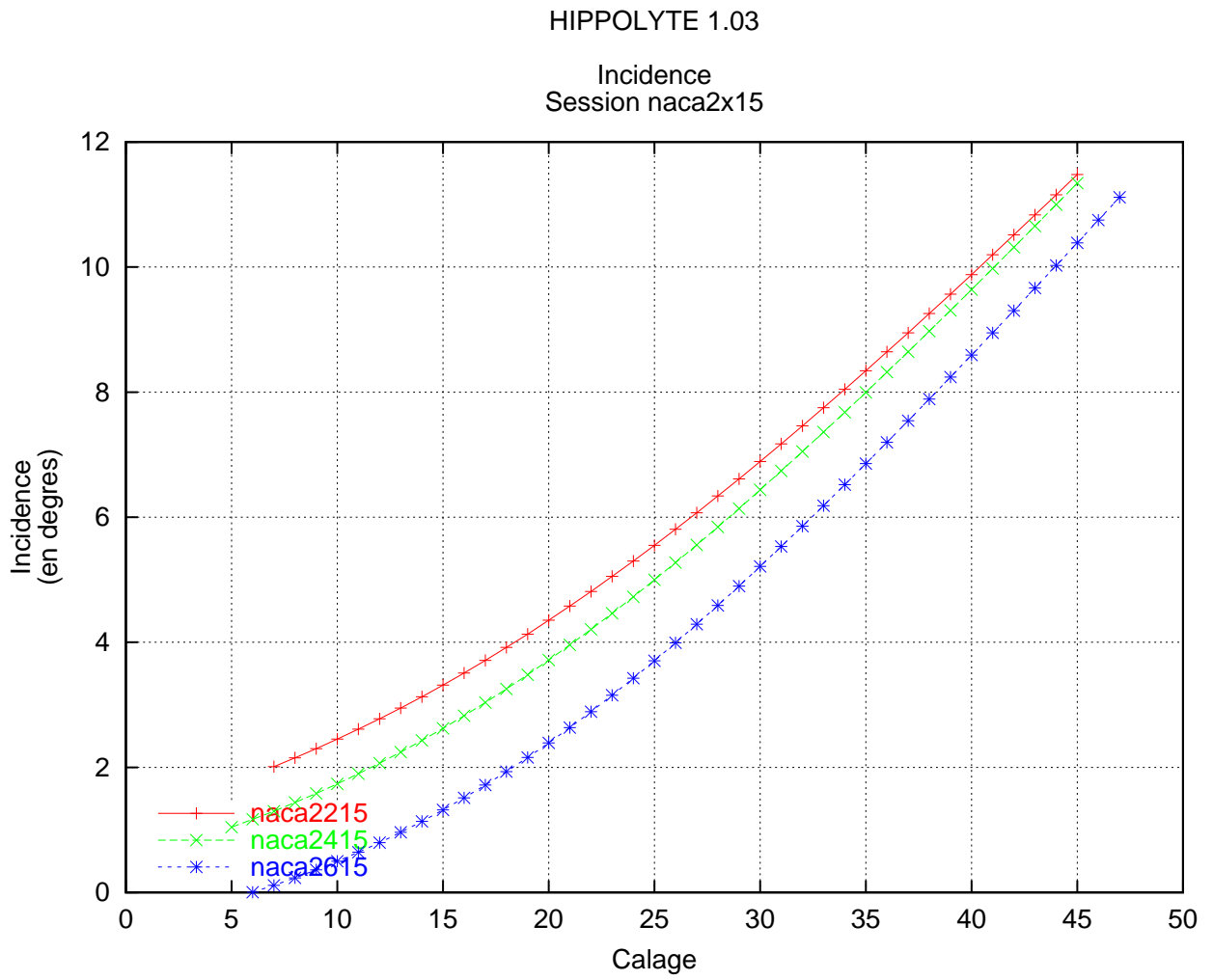
2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

qu'une voile centrée avant ne pourra peut-être pas être calée à son calage de finesse max (trop proche du décrochage).

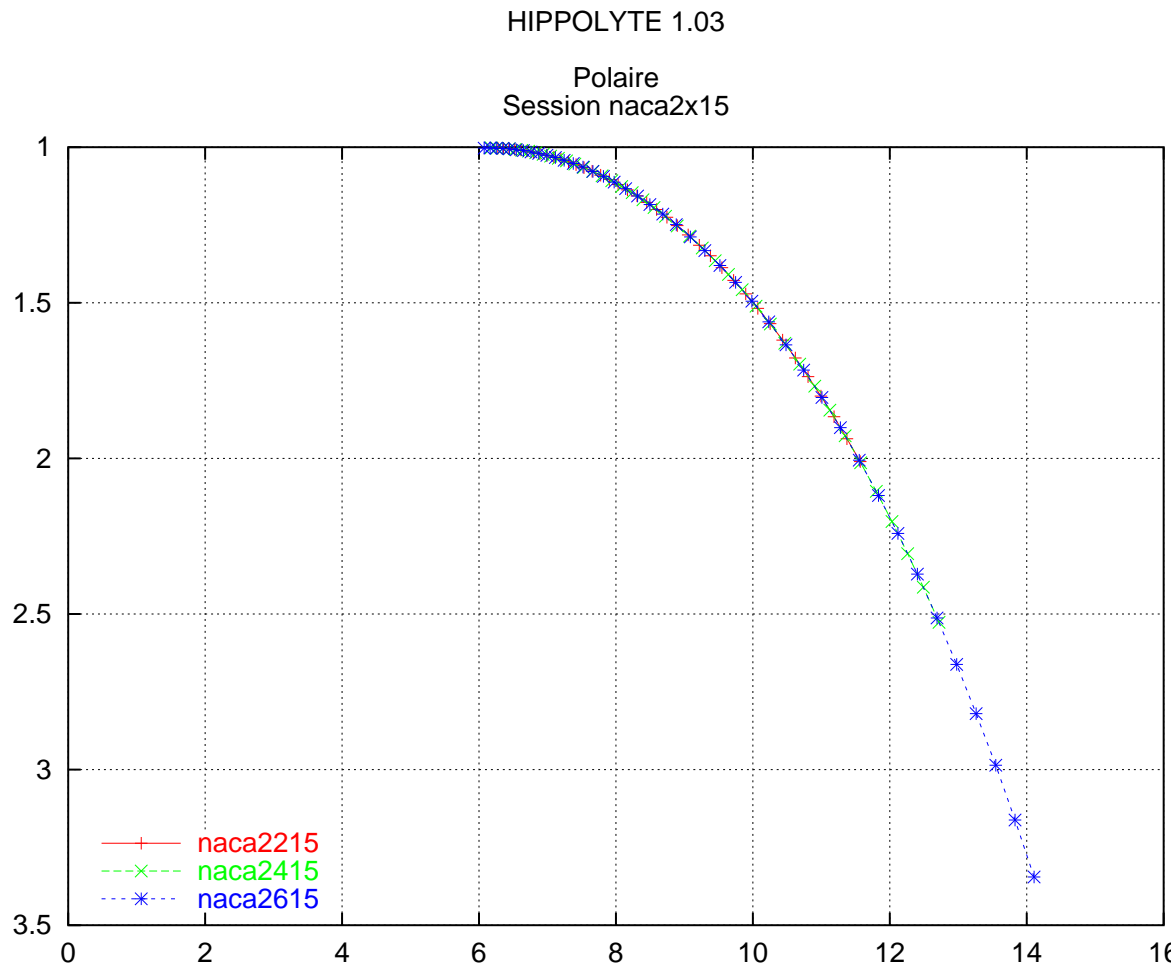




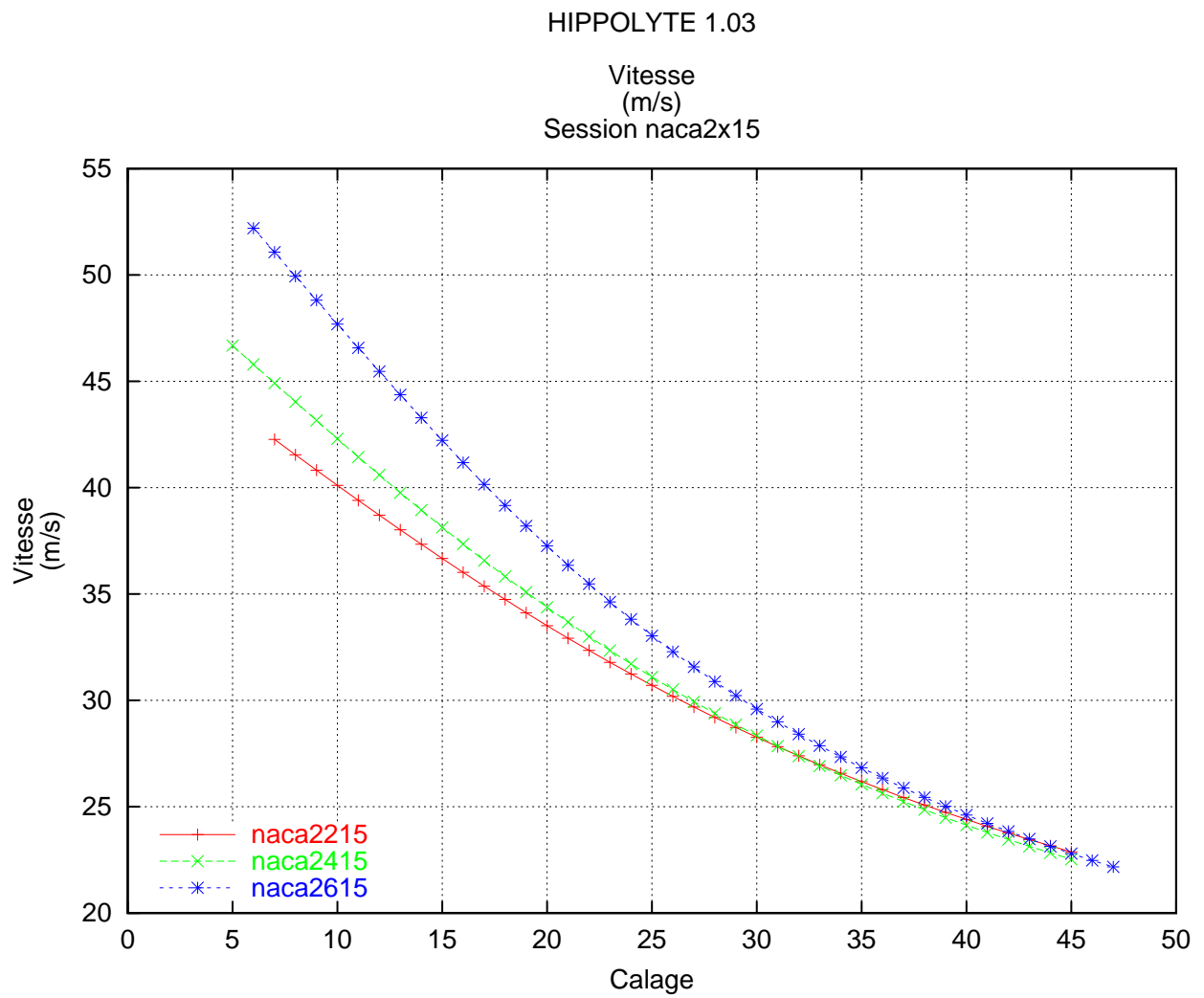
2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

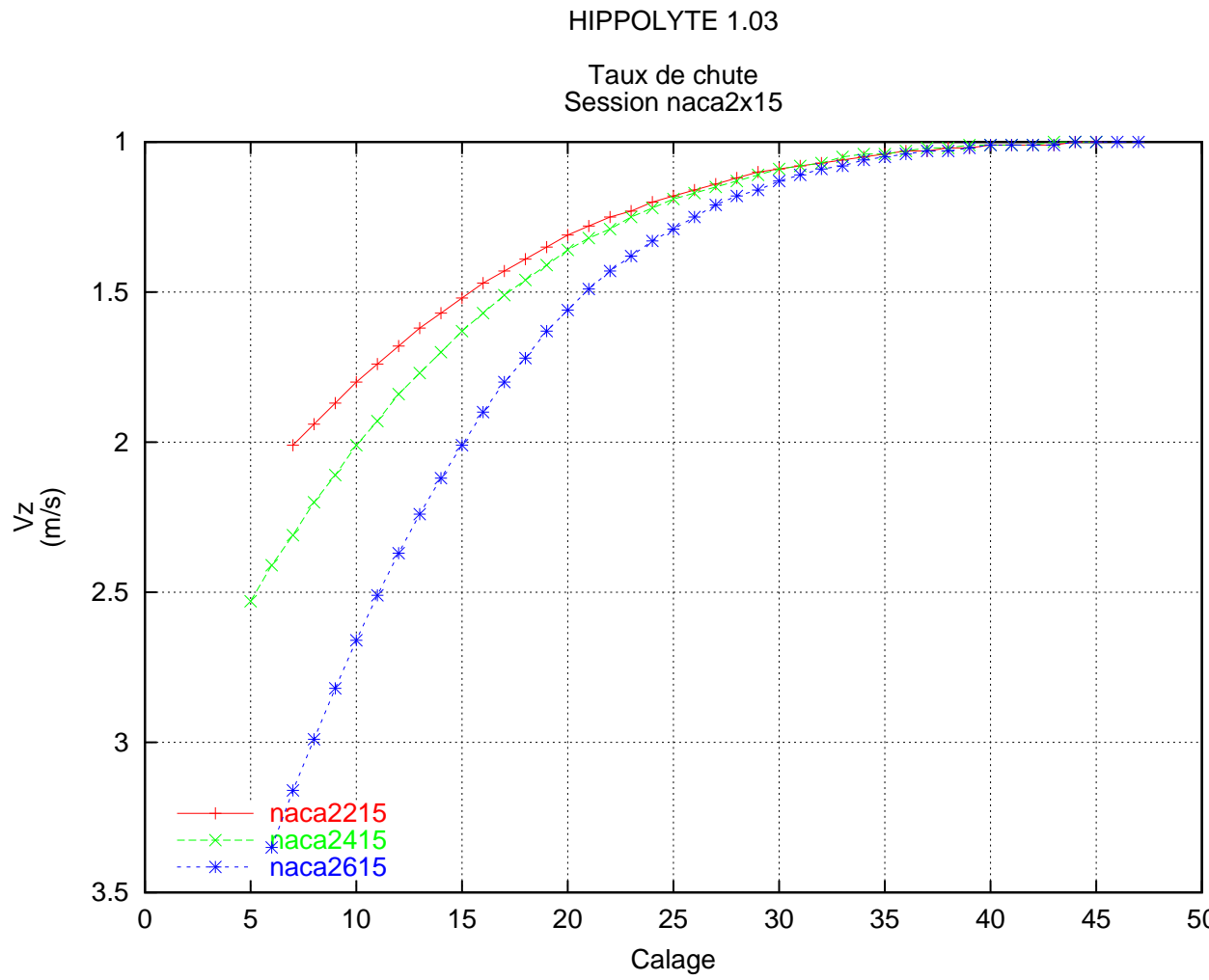


2 Résultats



2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

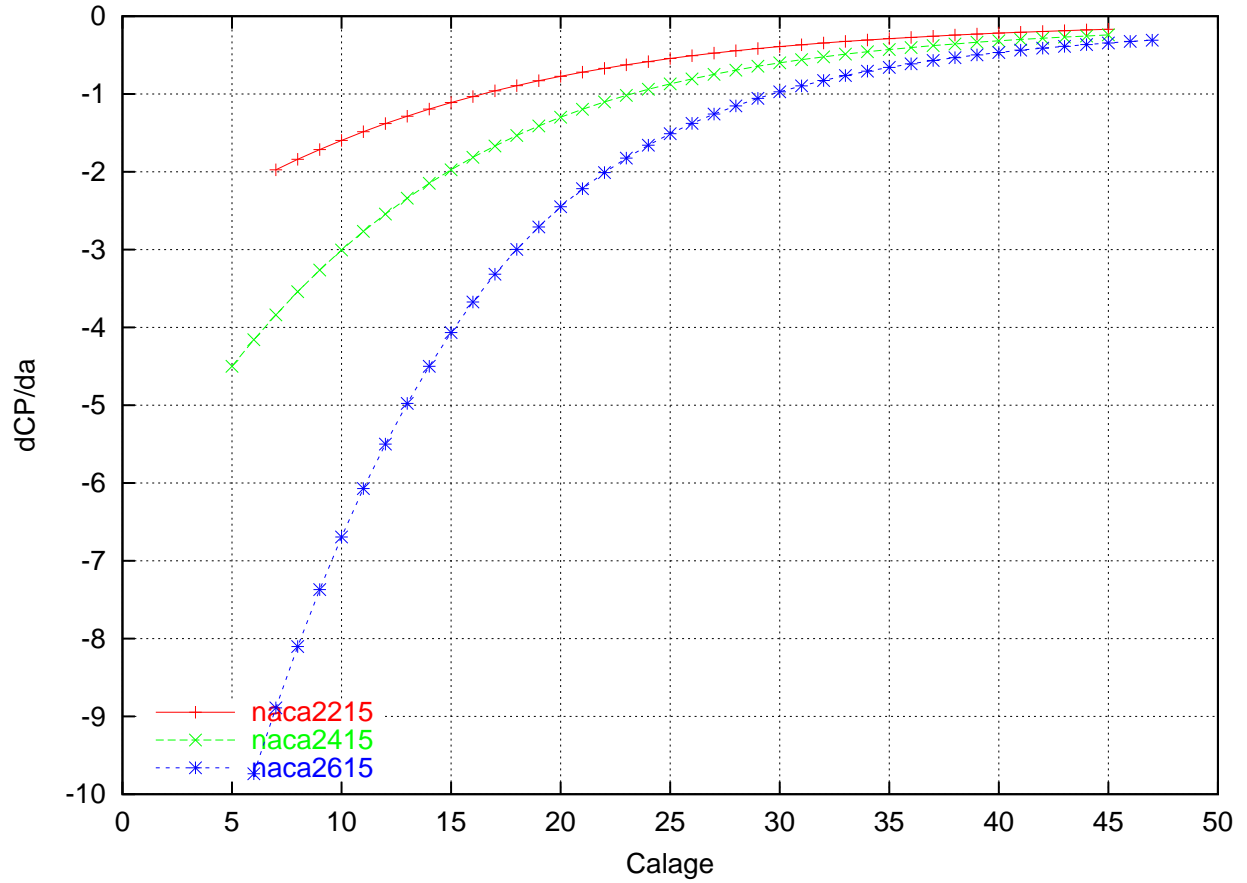




2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

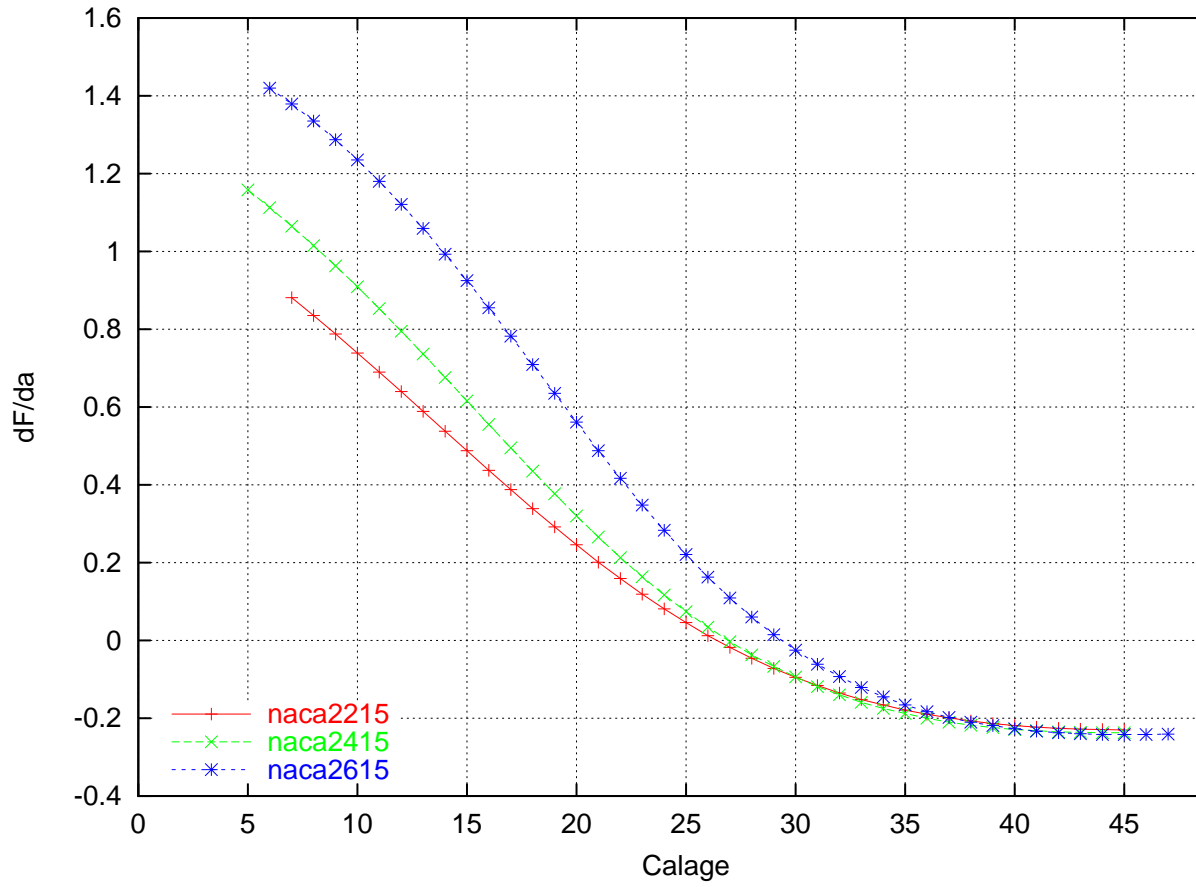
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session naca2x15



HIPPOLYTE 1.03

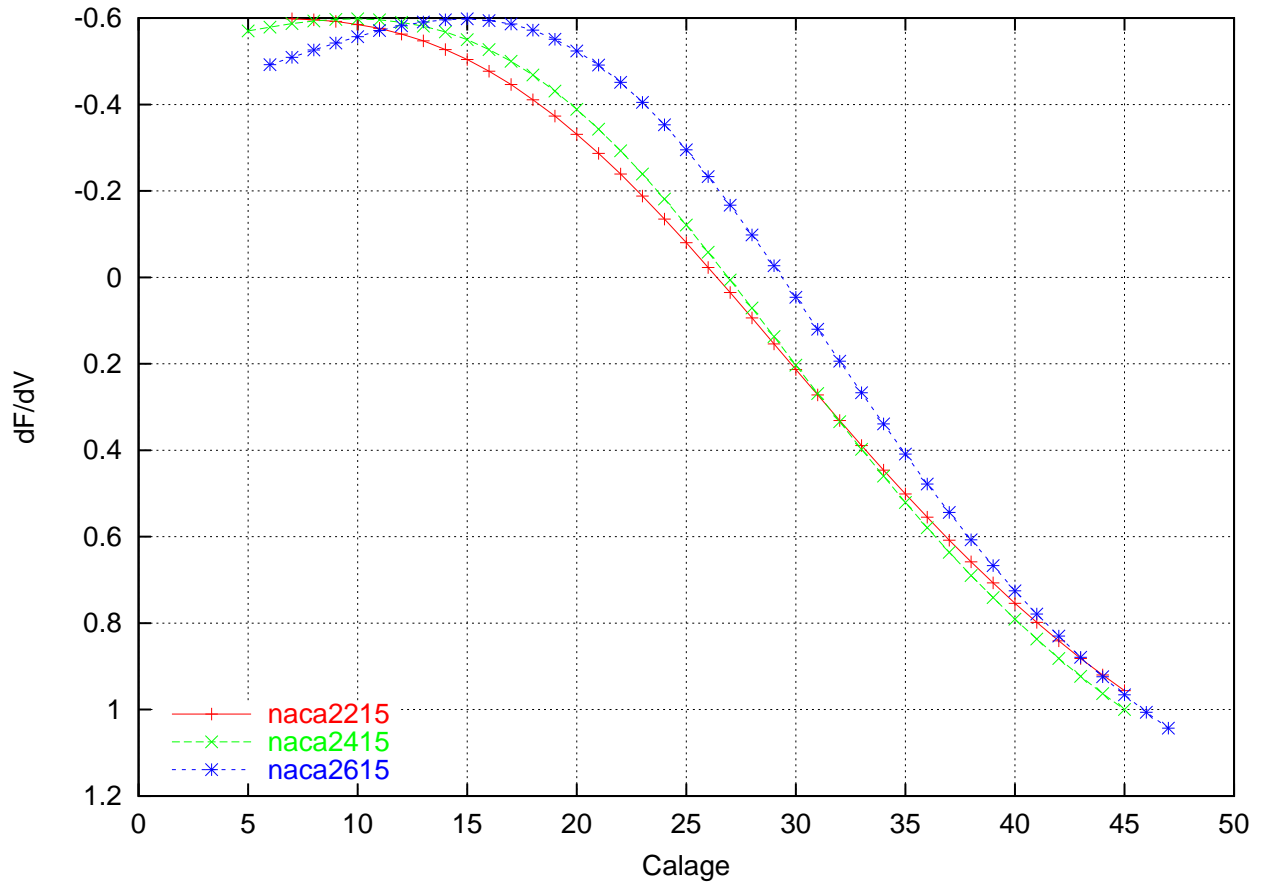
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session naca2x15

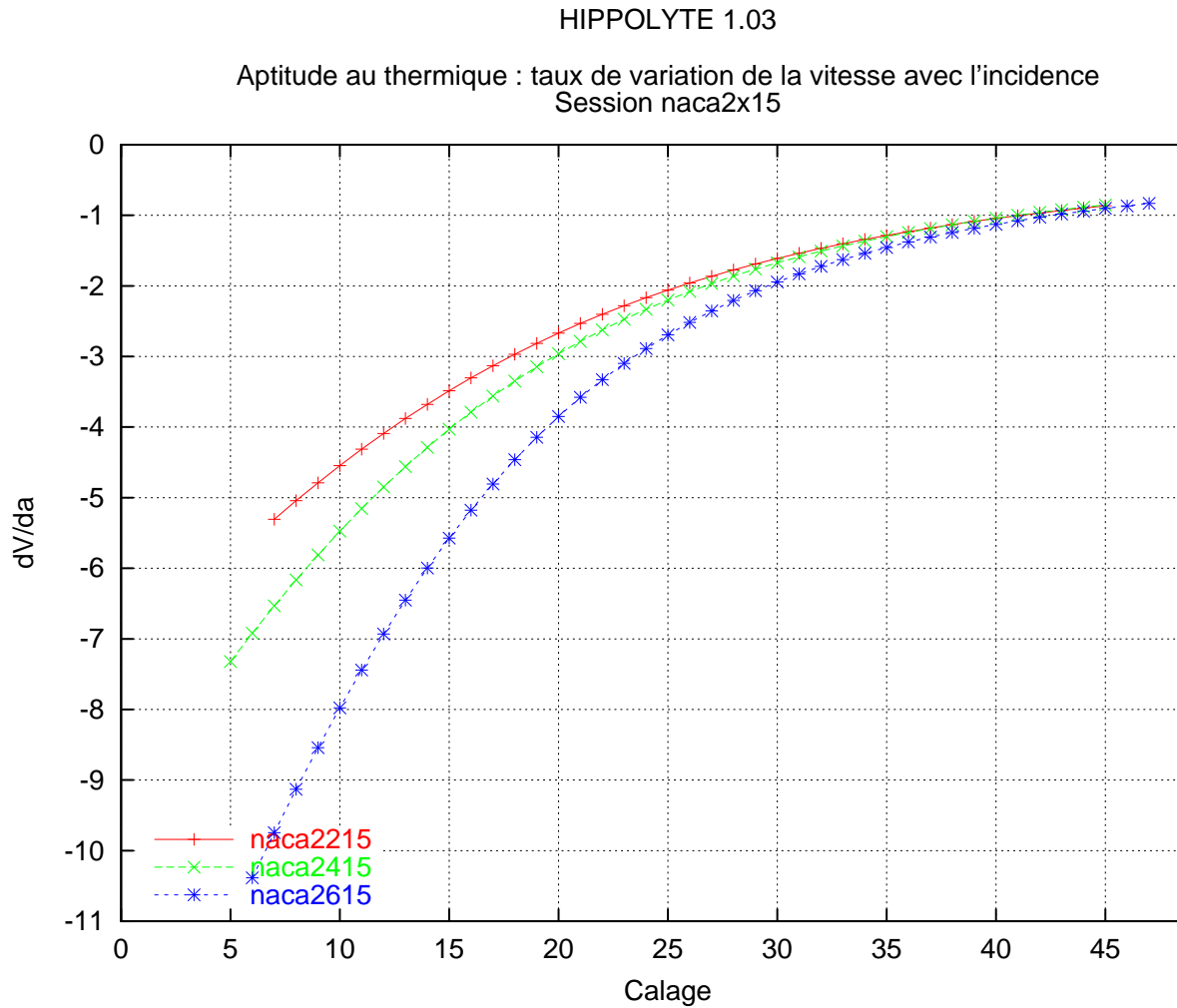


2.1 Influence du profil sur le comportement d'un parapente

HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session naca2x15





2.2 Influence de la forme en plan (point d'insertion)

On étudie ici l'influence du point d'insertion (ou flèche). Une insertion à $x\%$ signifie que les $x\%$ de corde sont alignés dans la forme en plan. Ainsi, une voile insérée à 0% est une voile au bord d'attaque rectiligne, une voile insérée à 100% est une voile au bord de fuite rectiligne.

Les simulations sont en trois dimensions, un bug dans le programme ne permet pas actuellement de donner le calage pour lequel intervient la fermeture frontale. Par contre l'apparition du décrochage est correctement prévue.

La voile étudiée est basée sur le modèle Kenya, avec une insertion à 20% , 50% et 80% . On compare également avec le modèle Metpat (profil progressif Kenya en centre d'aile, Ibis en bout d'aile, insertion à 50%). La configuration de base comporte les paramètres suivants :

NOMBRE DE CONFIG

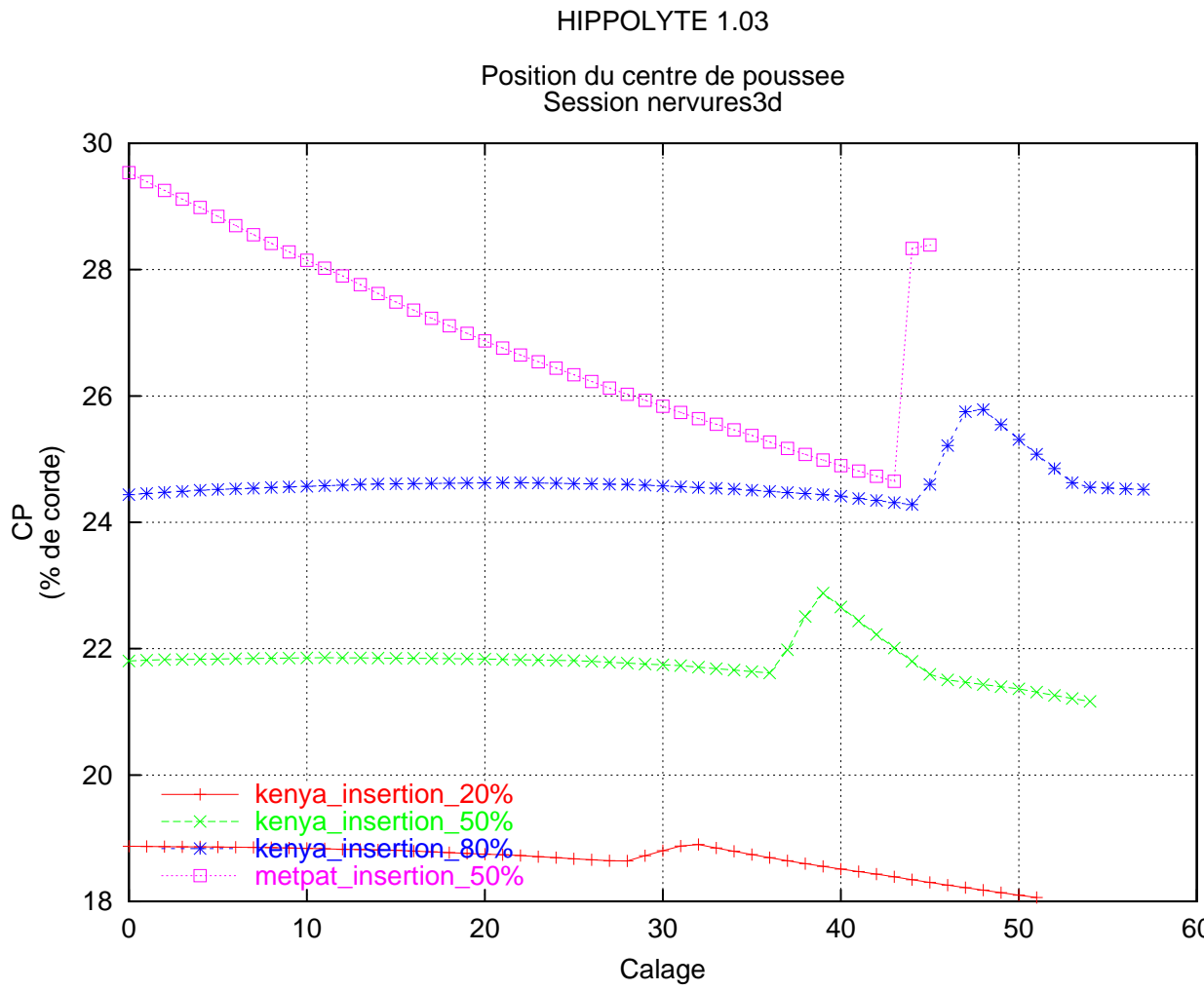
4

2.2 Influence de la forme en plan (point d'insertion)

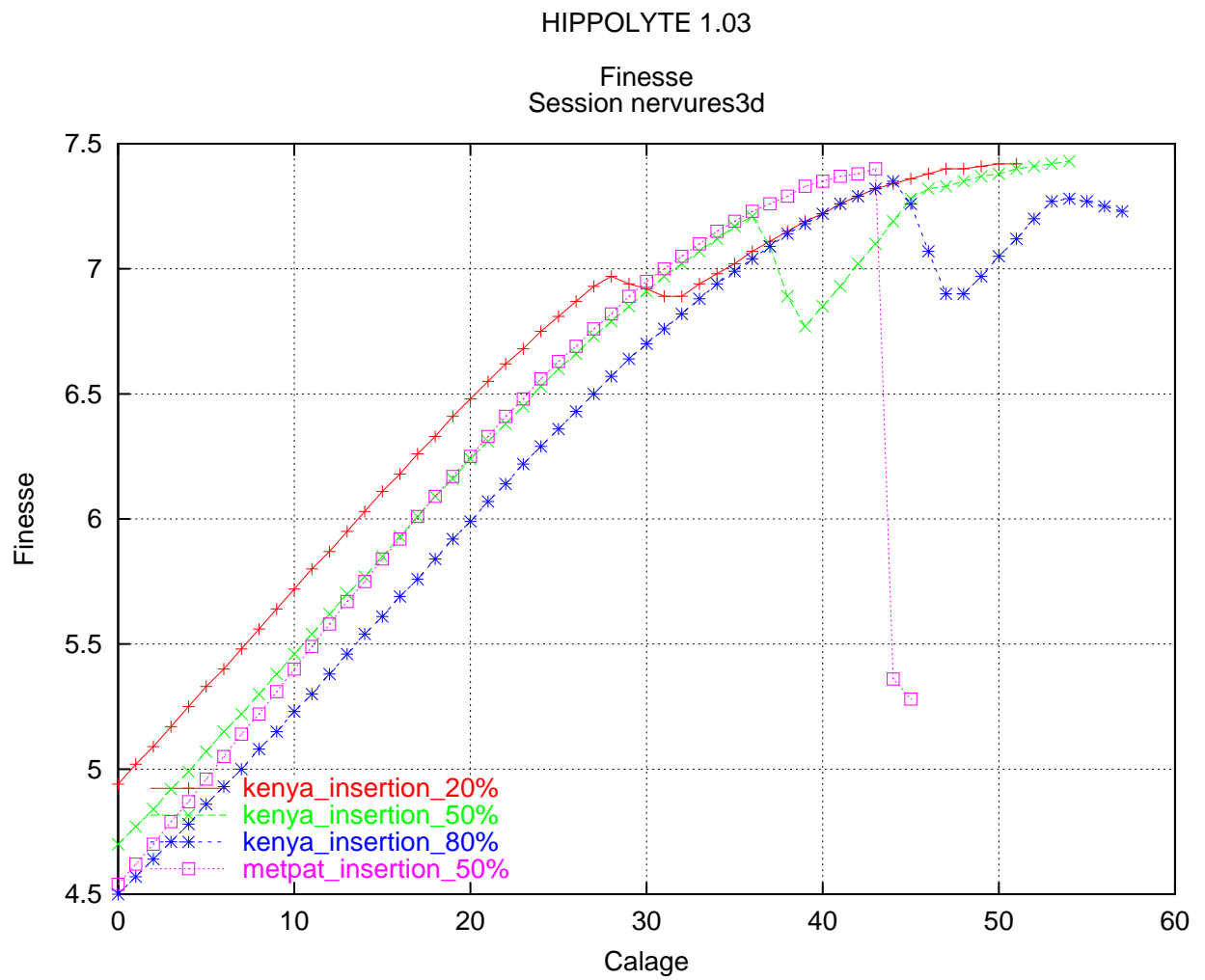
```
#je fais varier la fleche a 20%, 50% et 80%, voile Kenya
# je rajoute la Metpat a la fin
CONFIG1
  REPERTOIRE D'ENTREE      /home/simulations/voiles/kenya20_/
  FICHER D'ENTREE         kenya20_.cmi
  NOM DE LA VOILE         kenya_insertion_20%
CONFIG2
  REPERTOIRE D'ENTREE      /home/simulations/voiles/kenya50_/
  FICHER D'ENTREE         kenya50_.cmi
  NOM DE LA VOILE         kenya_insertion_50%
CONFIG3
  REPERTOIRE D'ENTREE      /home/simulations/voiles/kenya80_/
  FICHER D'ENTREE         kenya80_.cmi
  NOM DE LA VOILE         kenya_insertion_80%
CONFIG4
  REPERTOIRE D'ENTREE      /home/simulations/voiles/metpat/
  FICHER D'ENTREE         metpat.cmi
  NOM DE LA VOILE         metpat_insertion_50%
END
```

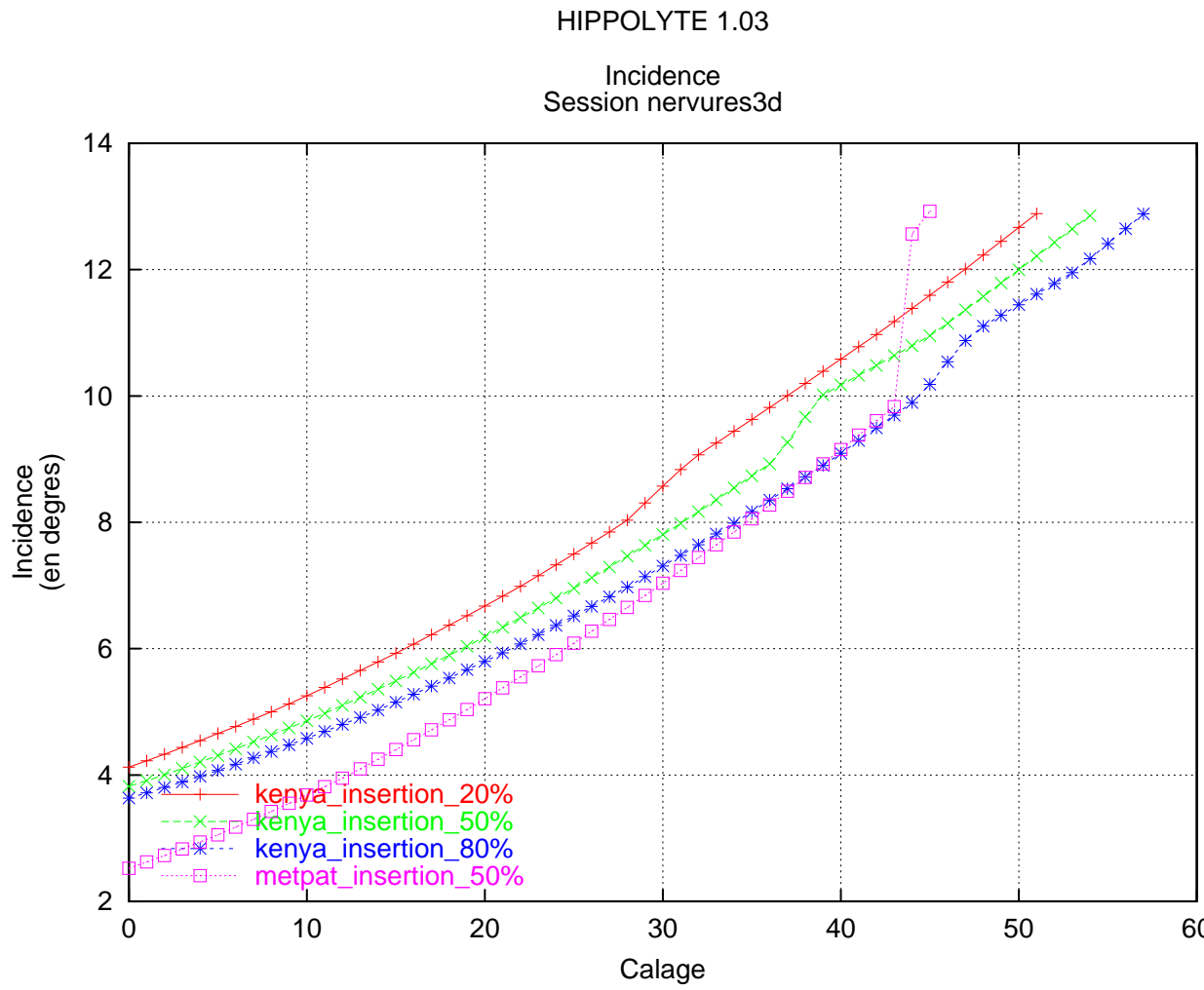
Les résultats fournis par le simulateur 3d présentent un point aberrant pour chaque configuration à un calage proche du décrochage...

De part la définition même du calage, il est normal que les voiles avec beaucoup de flèche admettent un calage plus arrière avant de décrocher. On rappelle que le calage est donné en % de corde centrale dans le cas 3d.



2.2 Influence de la forme en plan (point d'insertion)

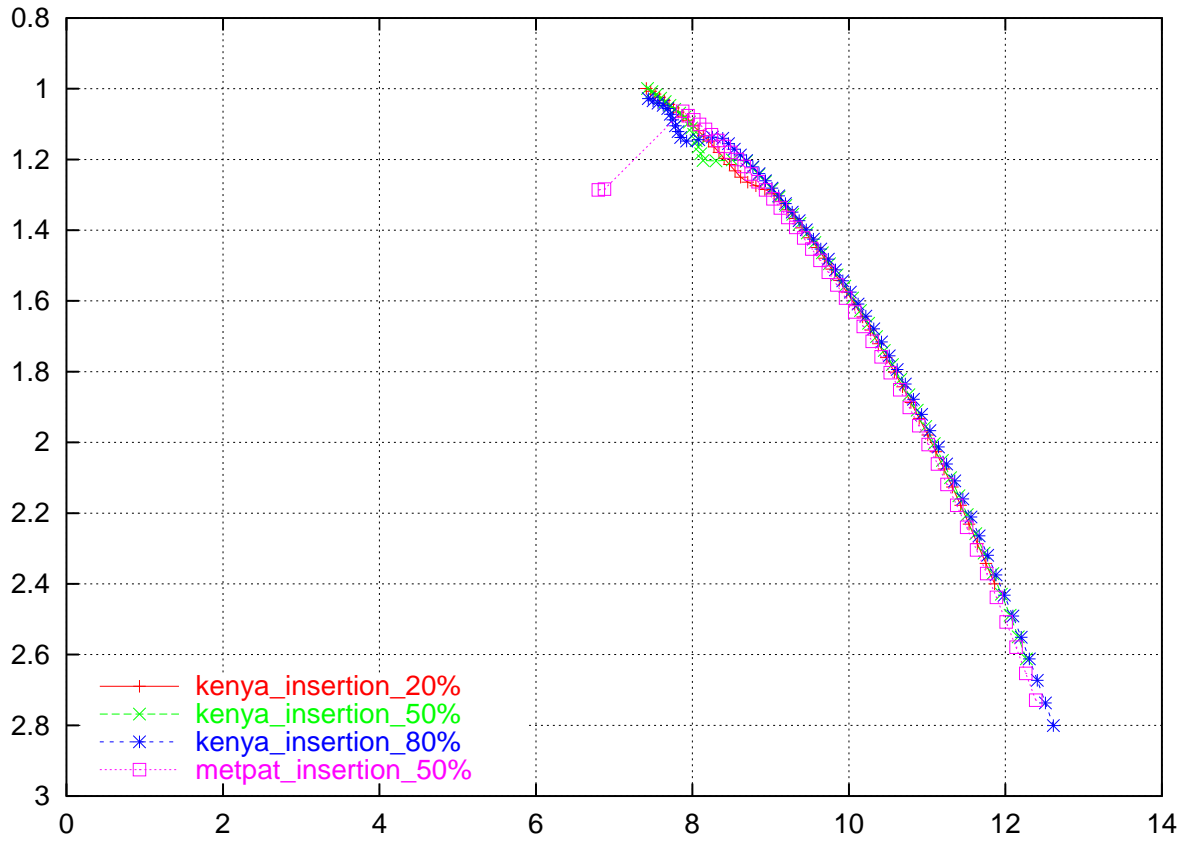


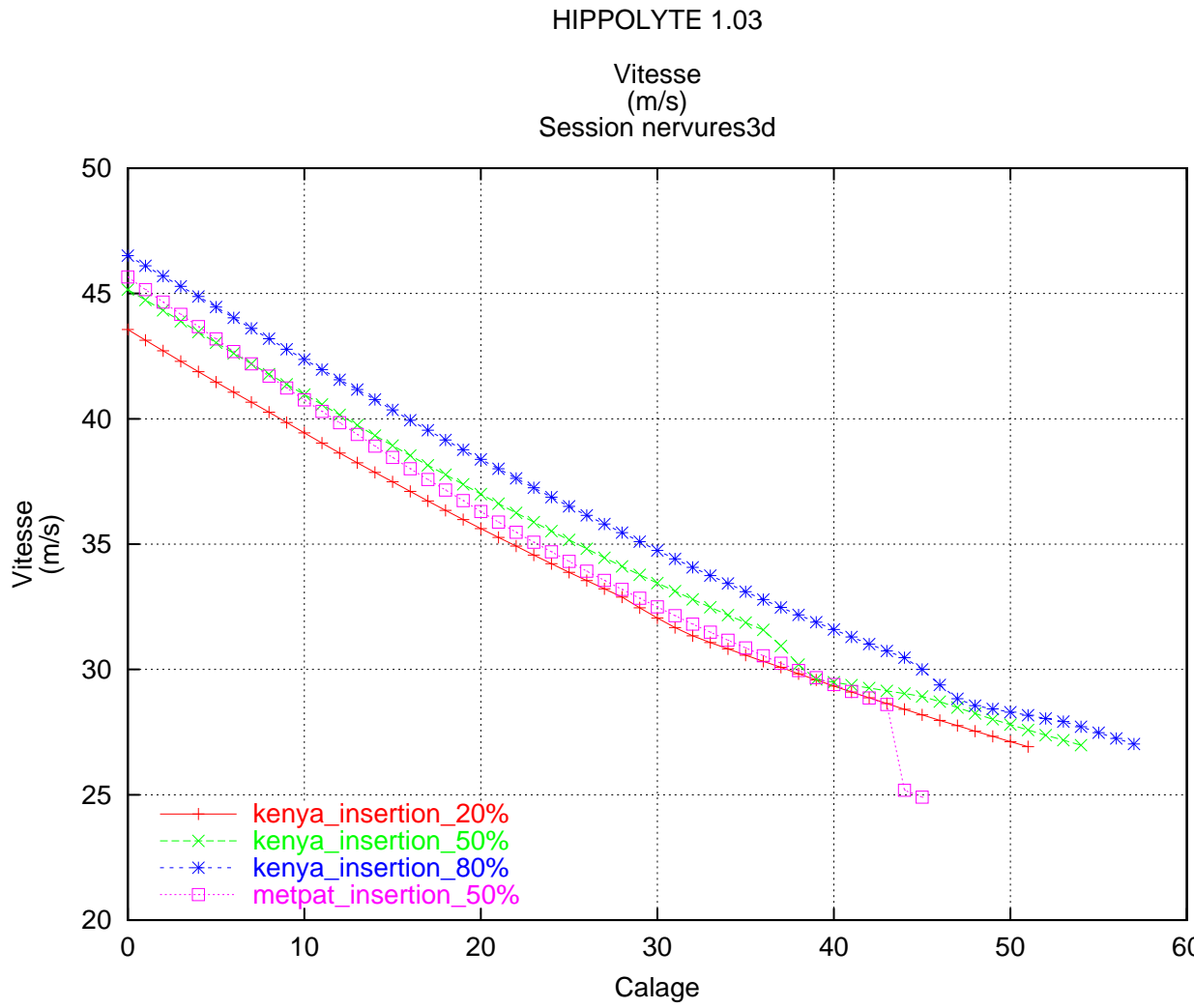


2.2 Influence de la forme en plan (point d'insertion)

HIPPOLYTE 1.03

Polaire
Session nervures3d

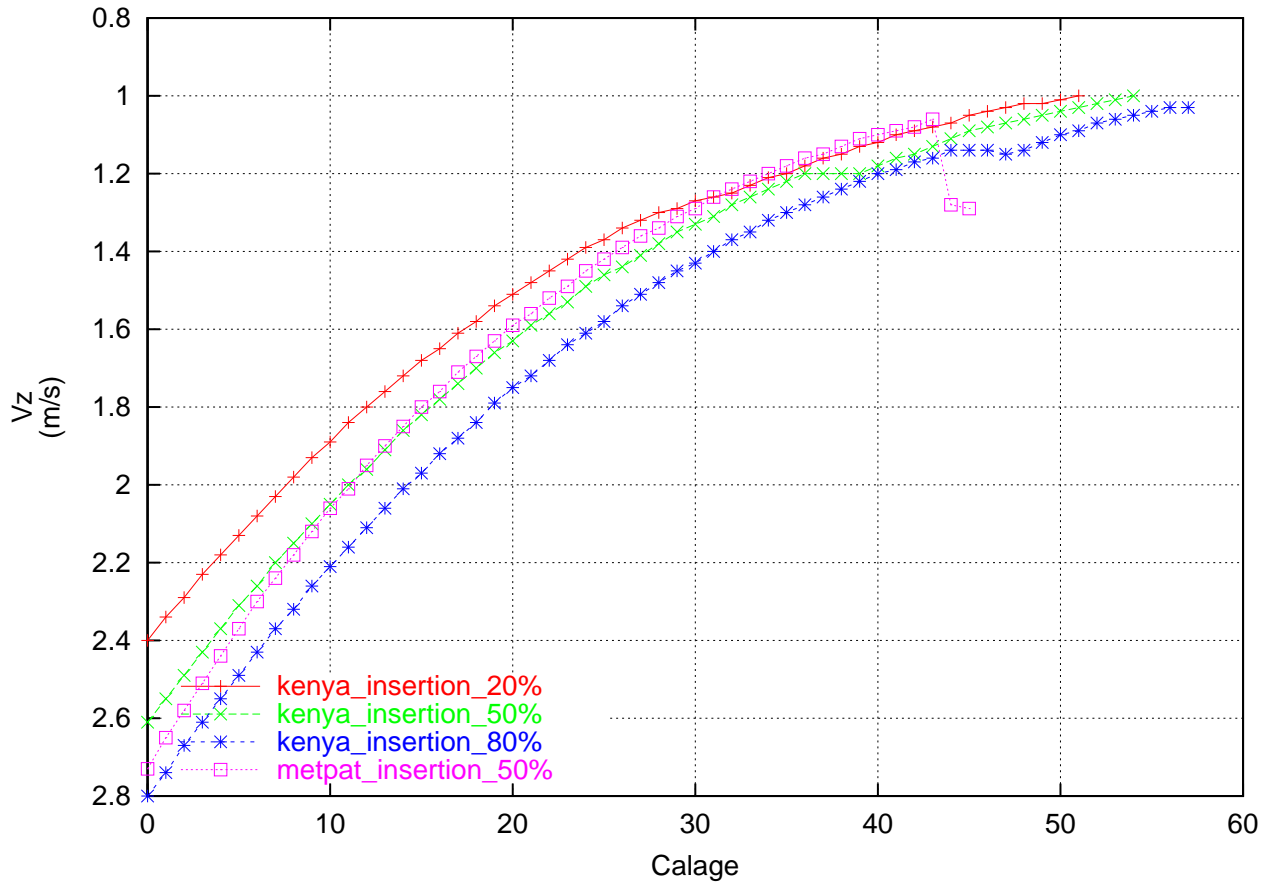




2.2 Influence de la forme en plan (point d'insertion)

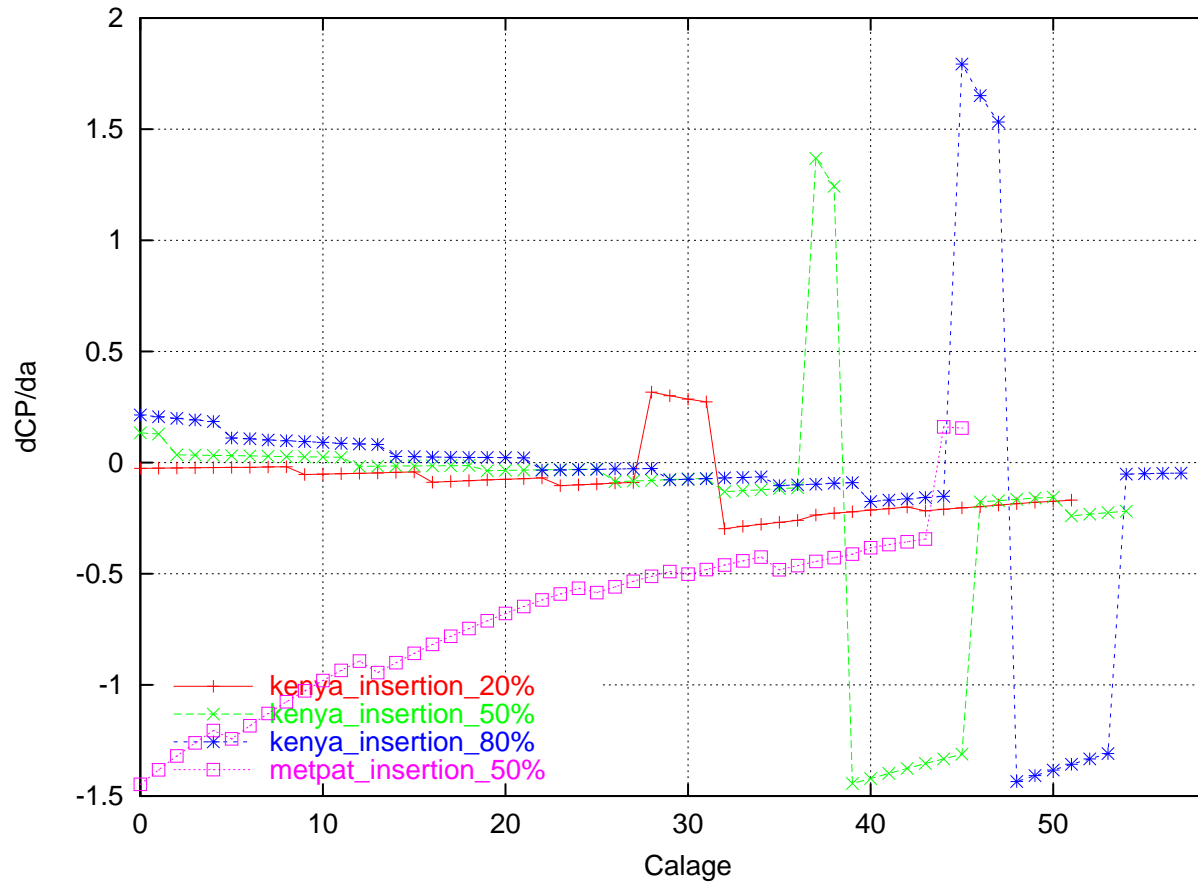
HIPPOLYTE 1.03

Taux de chute
Session nervures3d



HIPPOLYTE 1.03

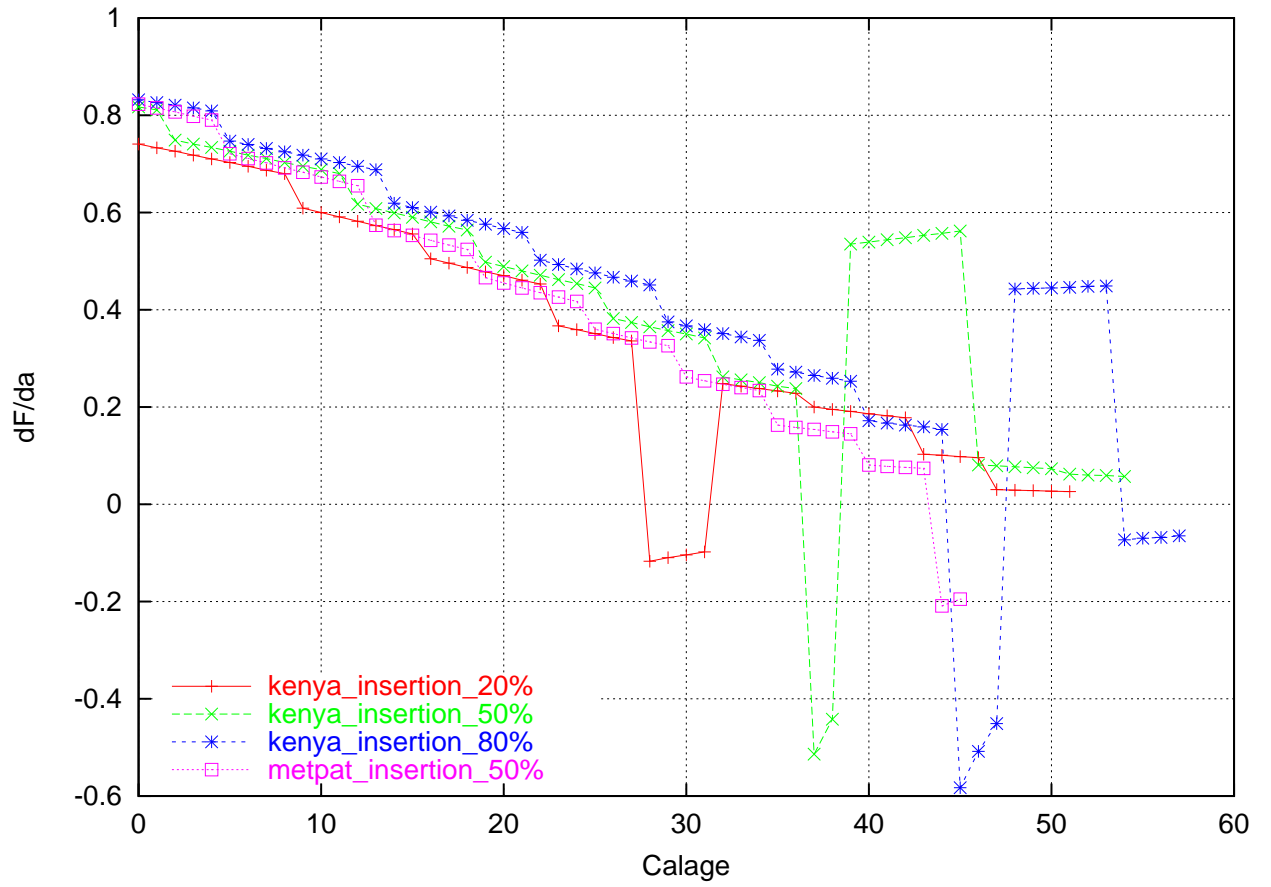
Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session nervures3d



2.2 Influence de la forme en plan (point d'insertion)

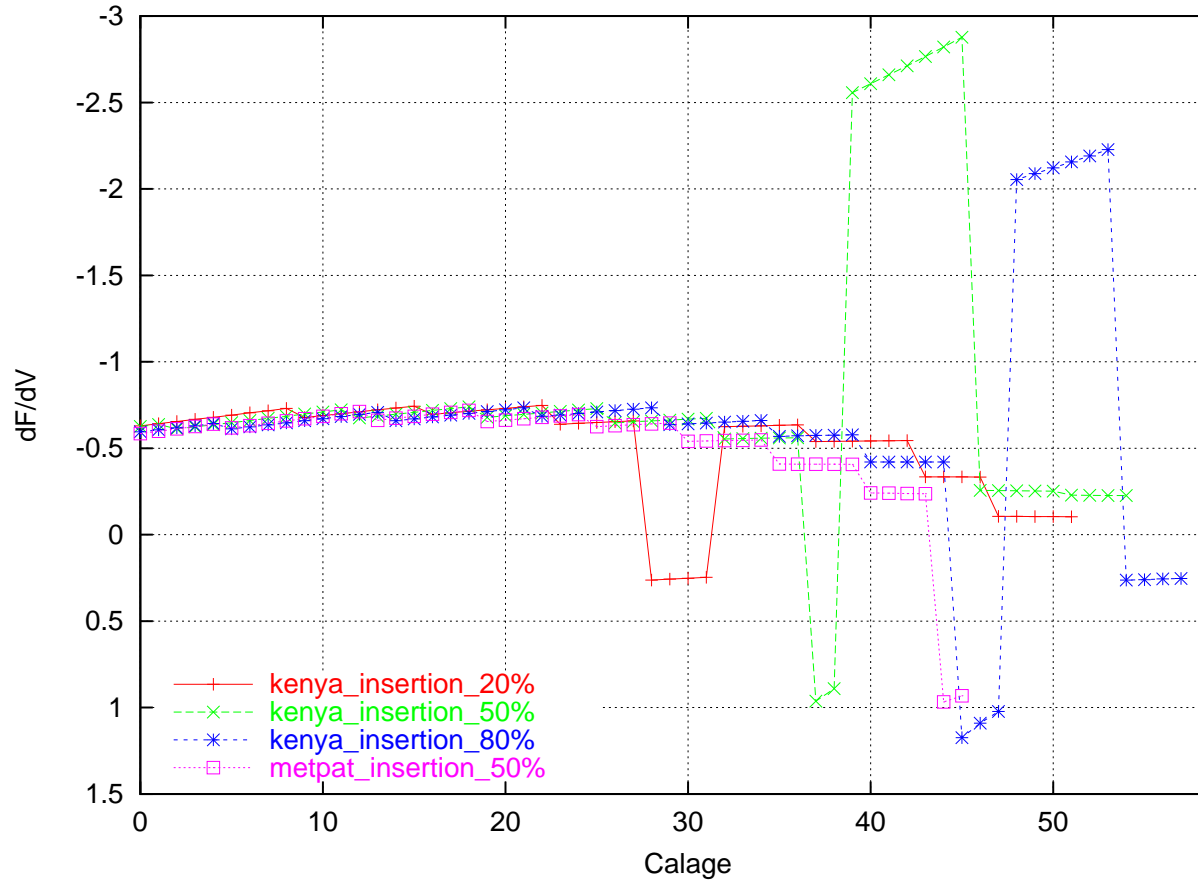
HIPPOLYTE 1.03

Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session nervures3d



HIPPOLYTE 1.03

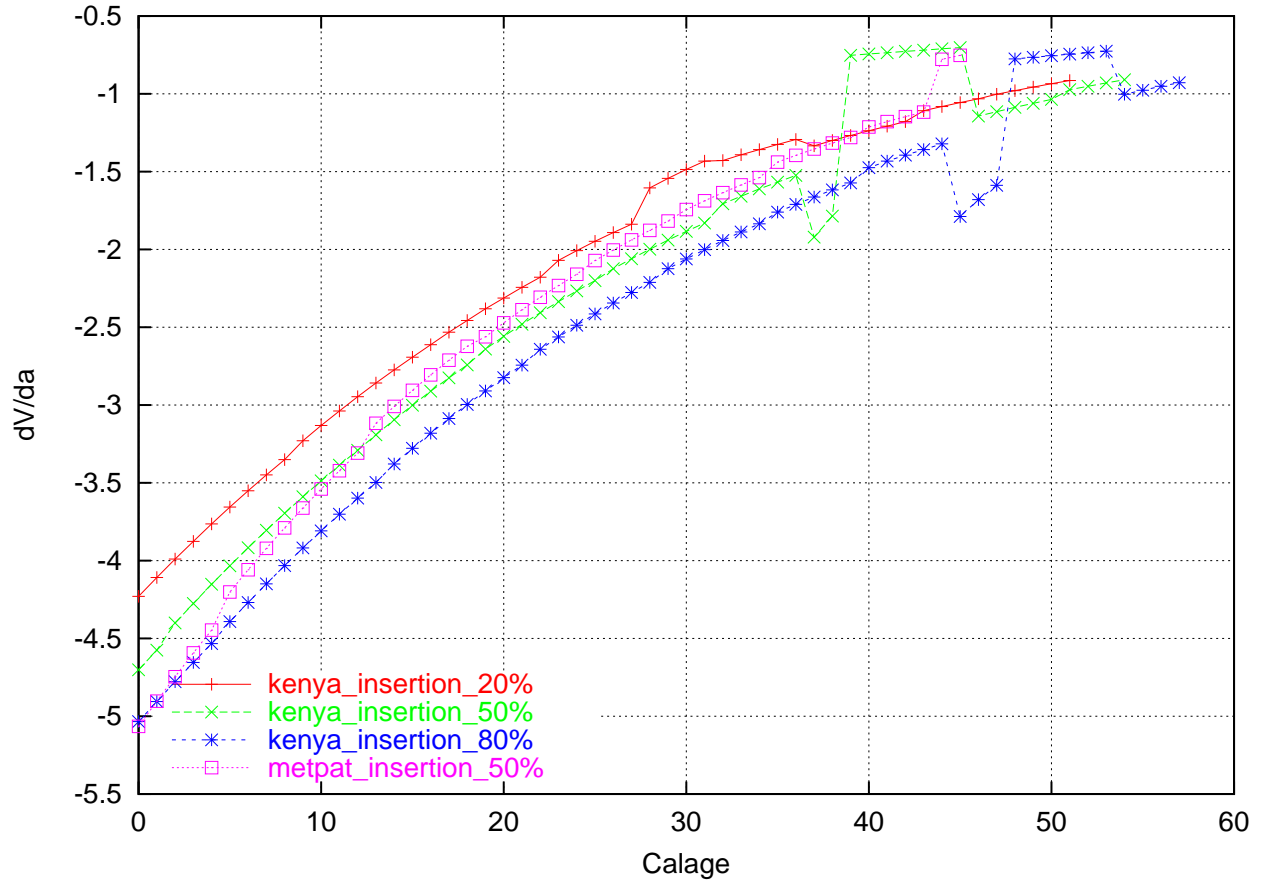
Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session nervures3d



2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session nervures3d



2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

On utilise le fichier suivant :

NOMBRE DE CONFIG

7

#je fais varier le profil (arbizon, ibis, kenya, bahia,cotiella)

CONFIG1

FICHER D'ENTREE arbizon.lis
NOM DE LA VOILE Profil Arbizon

CONFIG2

FICHER D'ENTREE cotiella.lis
NOM DE LA VOILE Profil Cotiella

CONFIG3

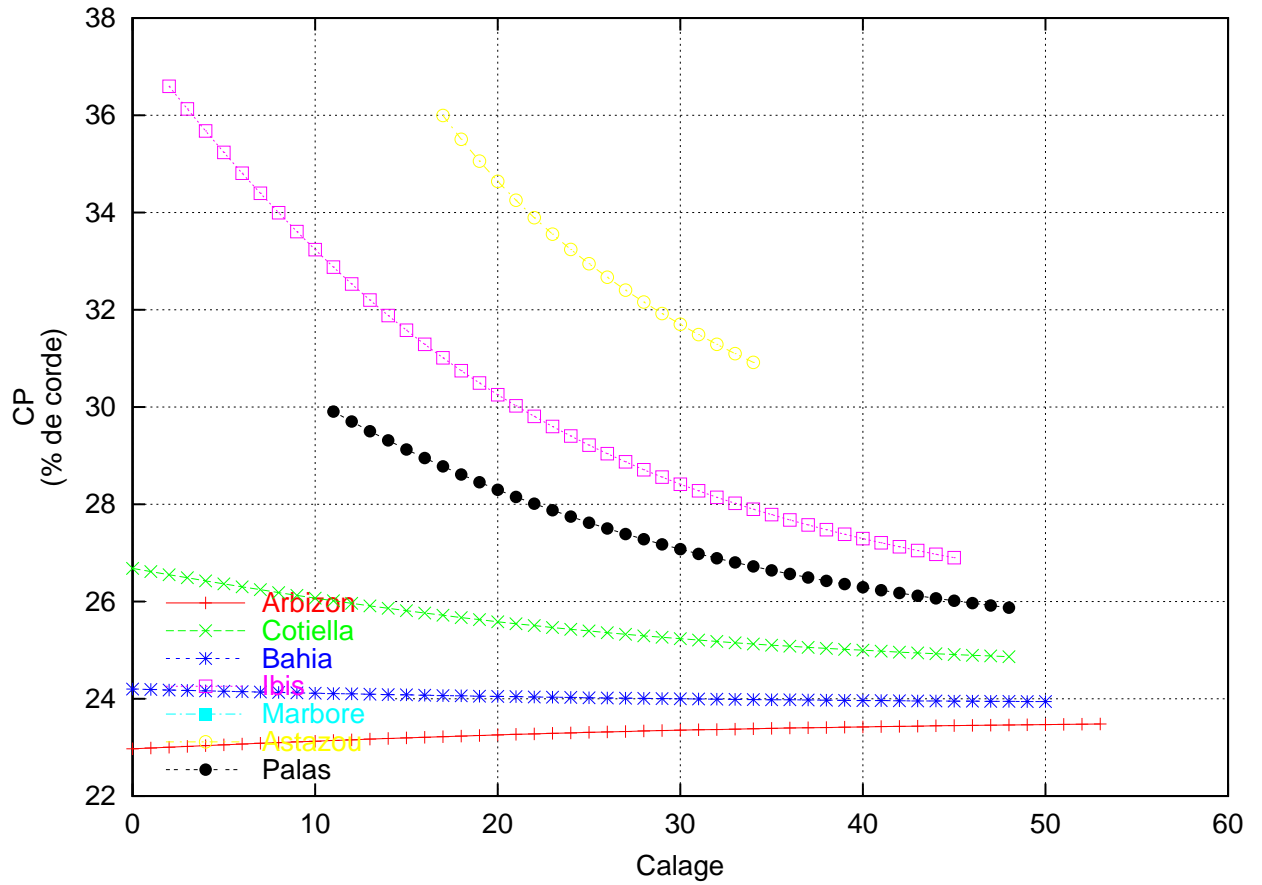
2 Résultats

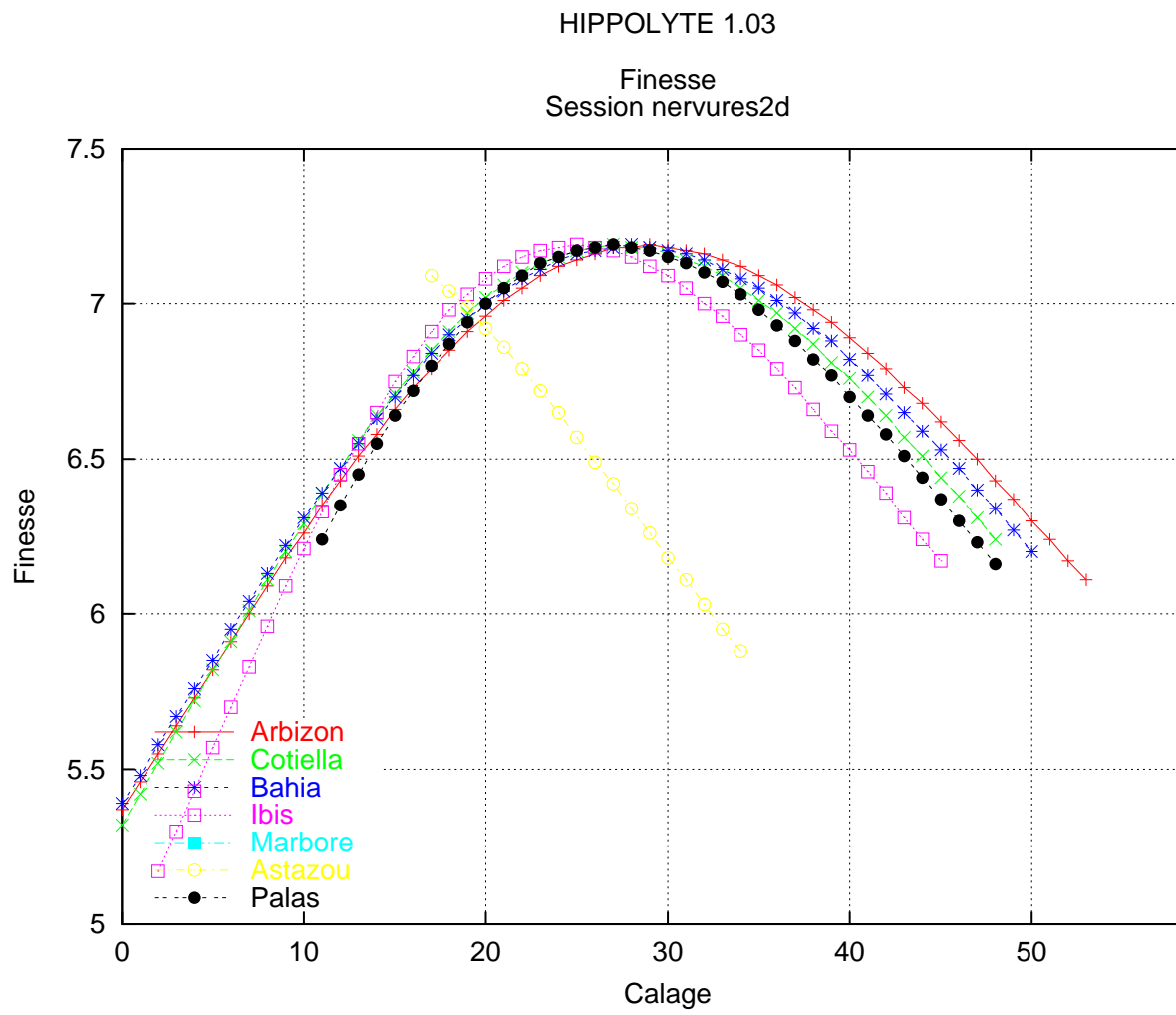
FICHER D'ENTREE	bahia.lis
NOM DE LA VOILE	Bahia
CONFIG4	
FICHER D'ENTREE	ibis.lis
NOM DE LA VOILE	Profil Ibis
CONFIG5	
FICHER D'ENTREE	marbore.cot
NOM DE LA VOILE	Profil Marbore
CONFIG6	
FICHER D'ENTREE	astazou.lis
NOM DE LA VOILE	Profil Astazou
CONFIG7	
FICHER D'ENTREE	palas.lis
NOM DE LA VOILE	Profil Palas
CONFIG8	
FICHER D'ENTREE	kenya.lis
NOM DE LA VOILE	Profil Kenya
END	

2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

HIPPOLYTE 1.03

Position du centre de pousse
Session nervures2d

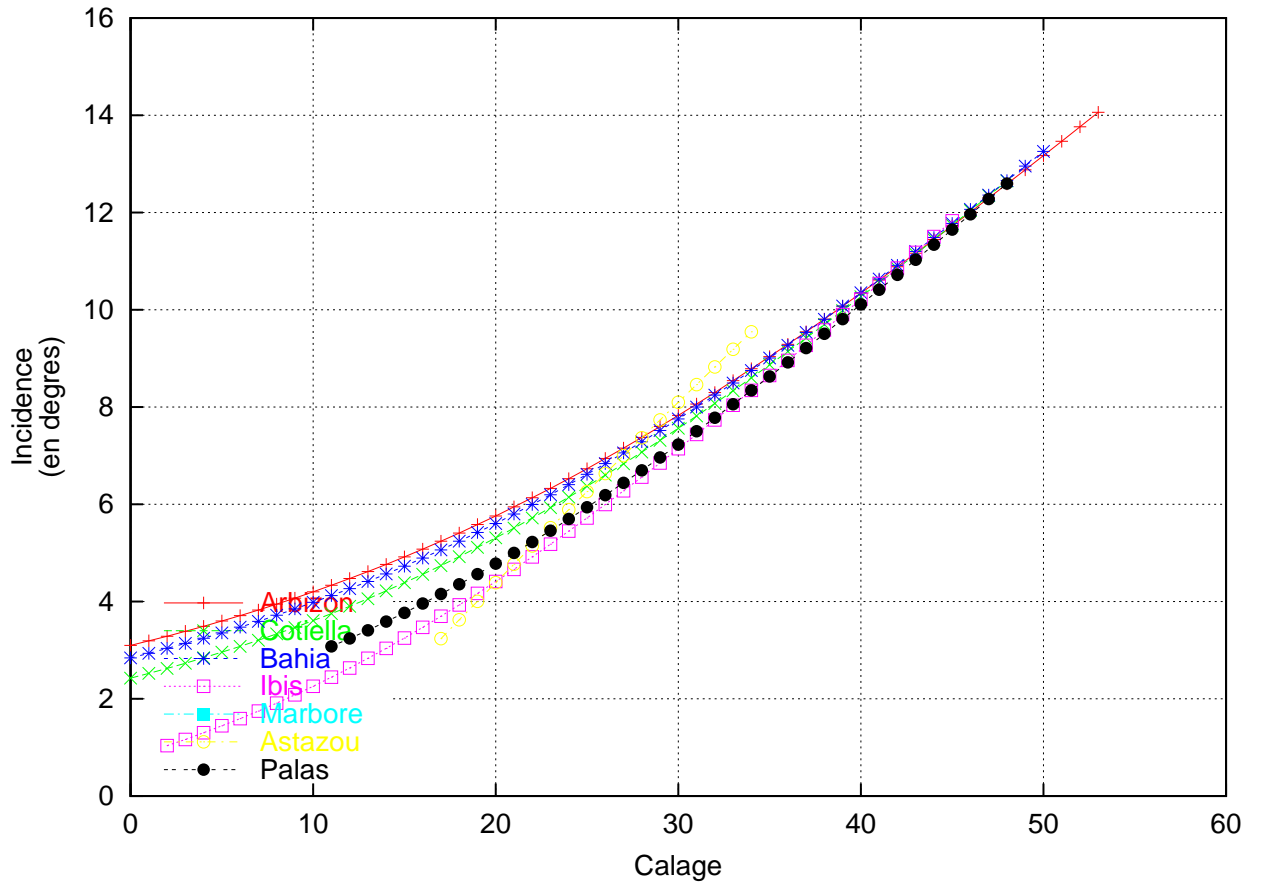


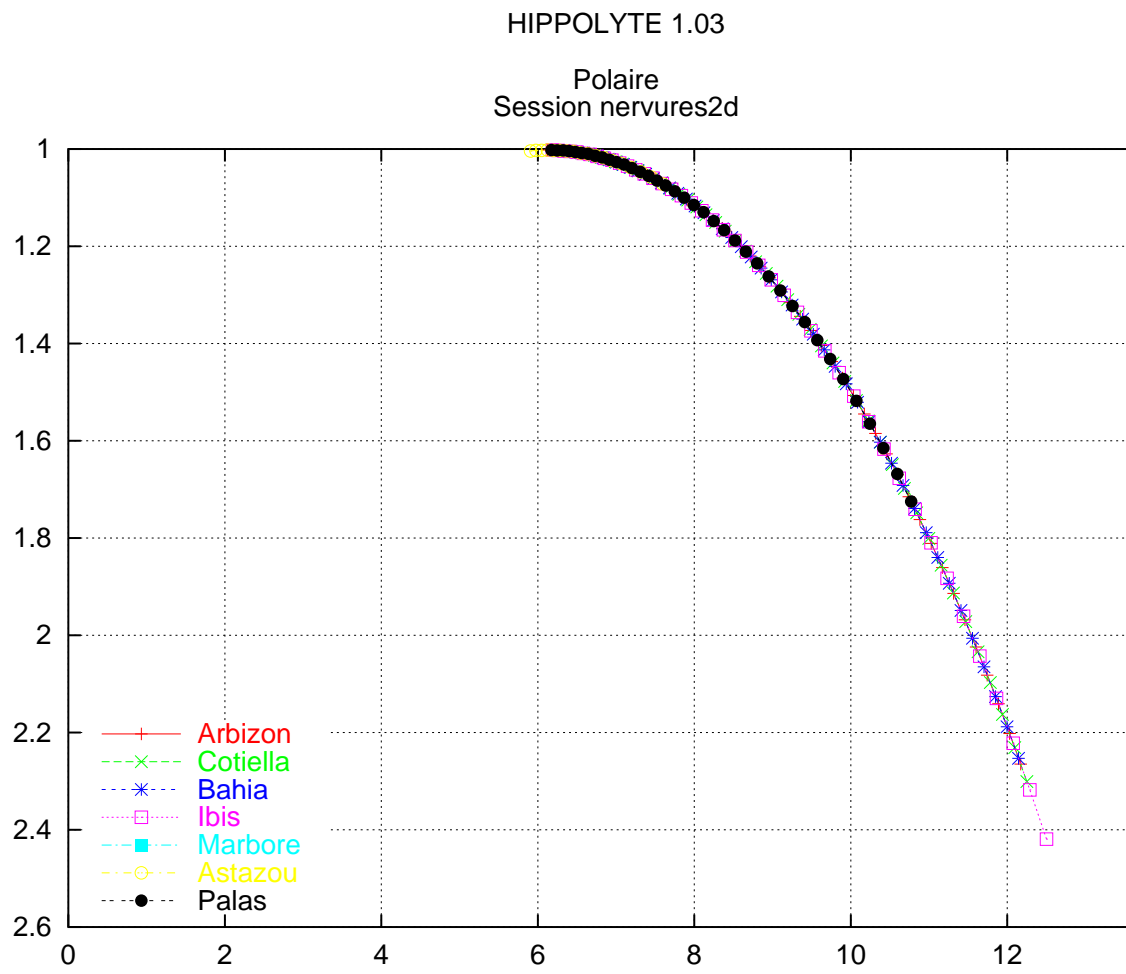


2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session nervures2d

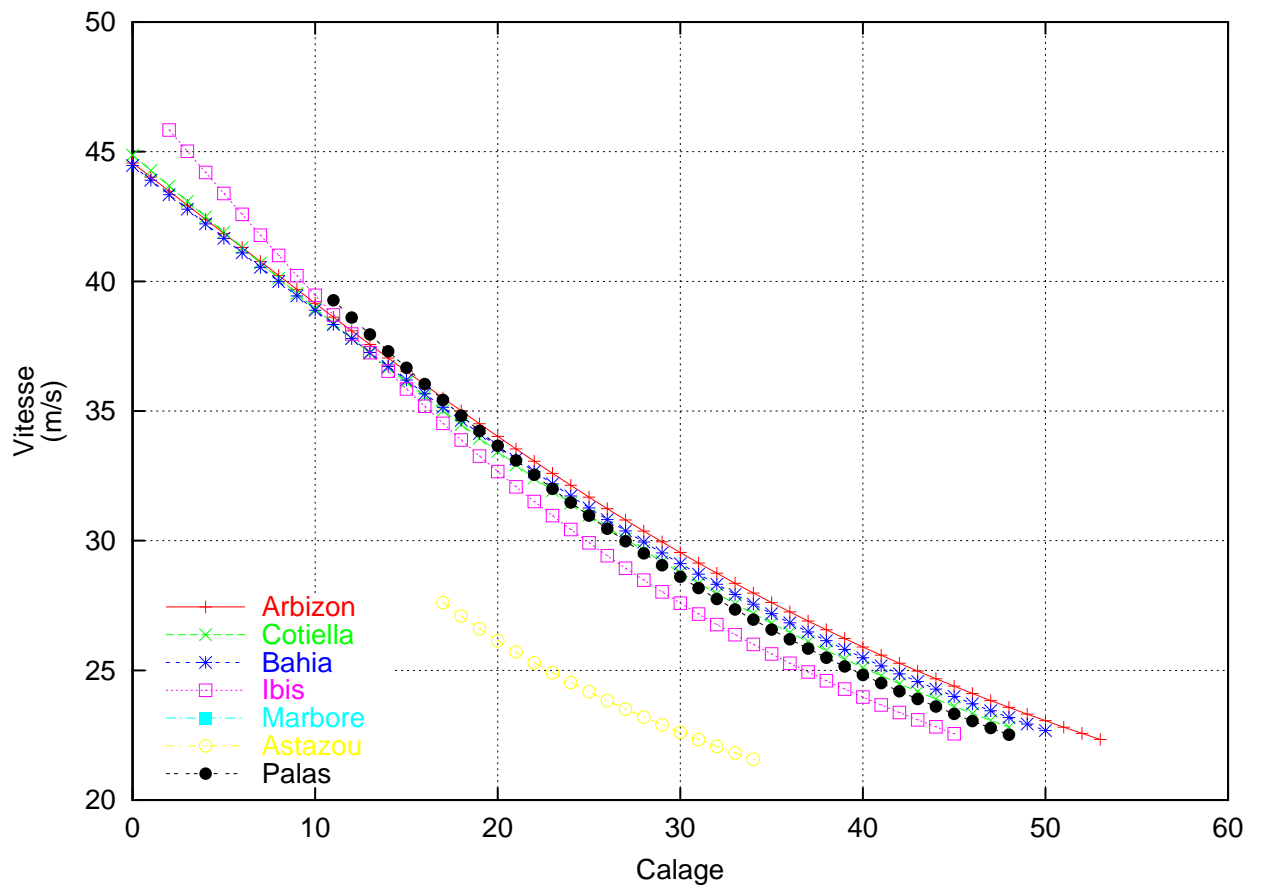


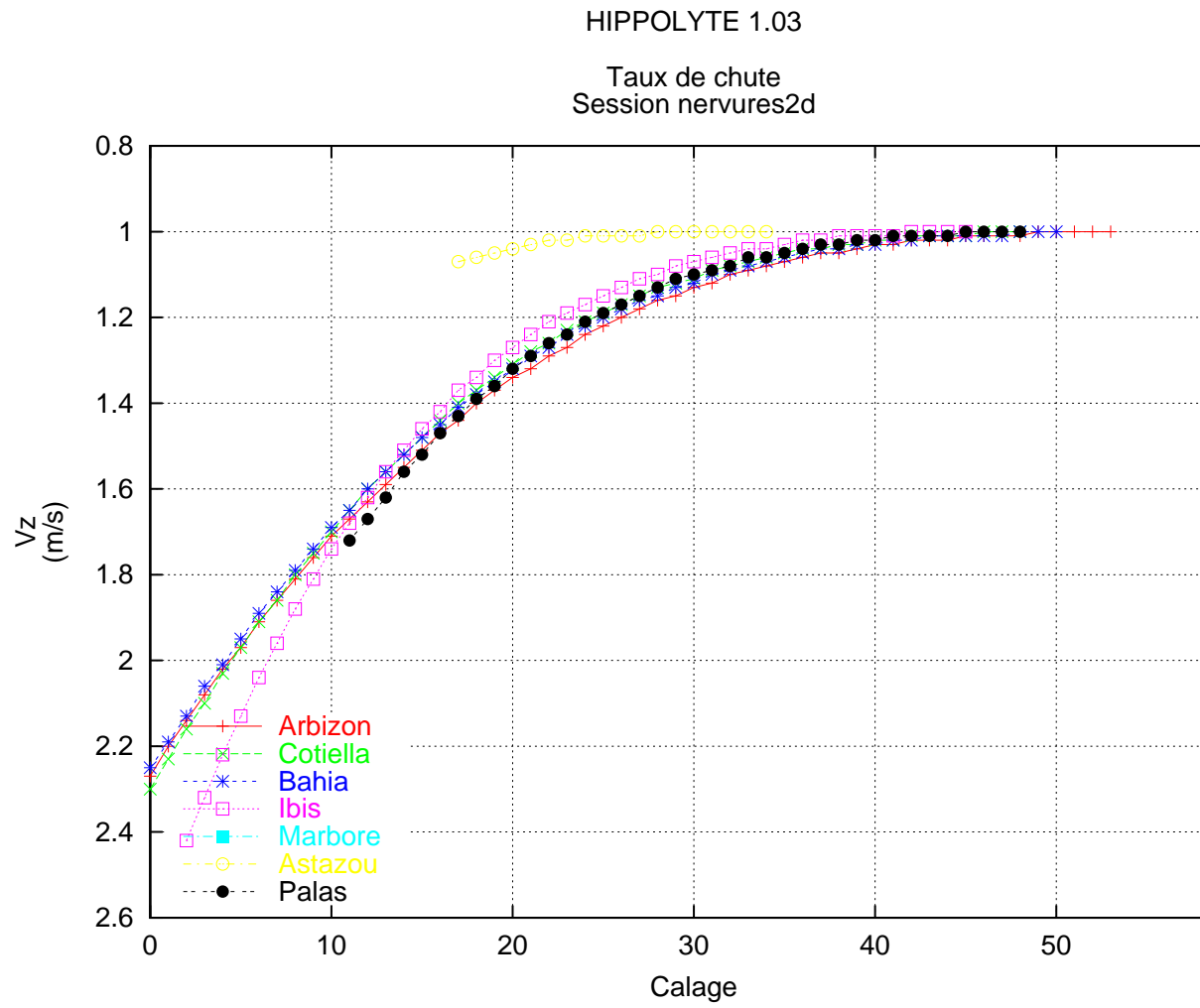


2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

HIPPOLYTE 1.03

Vitesse
(m/s)
Session nervures2d

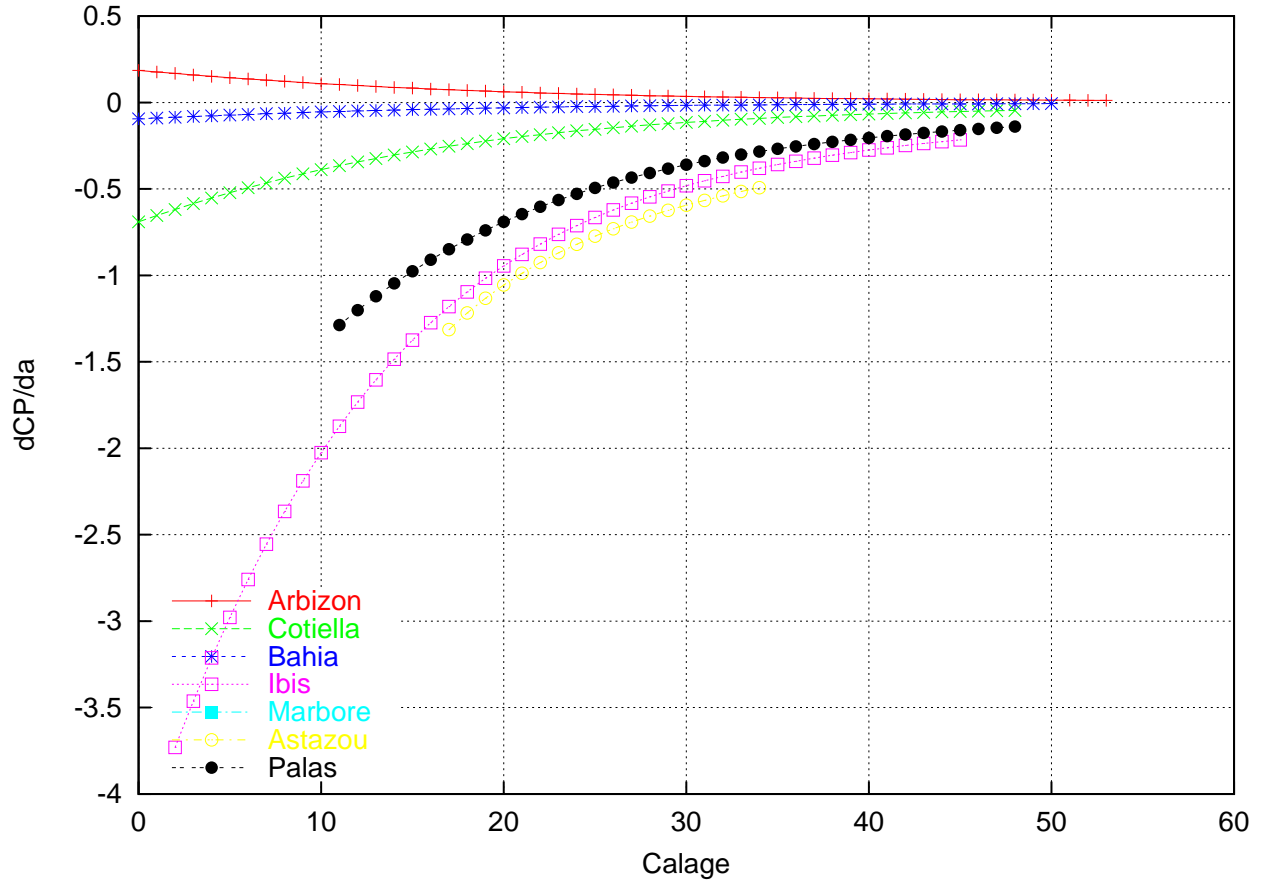


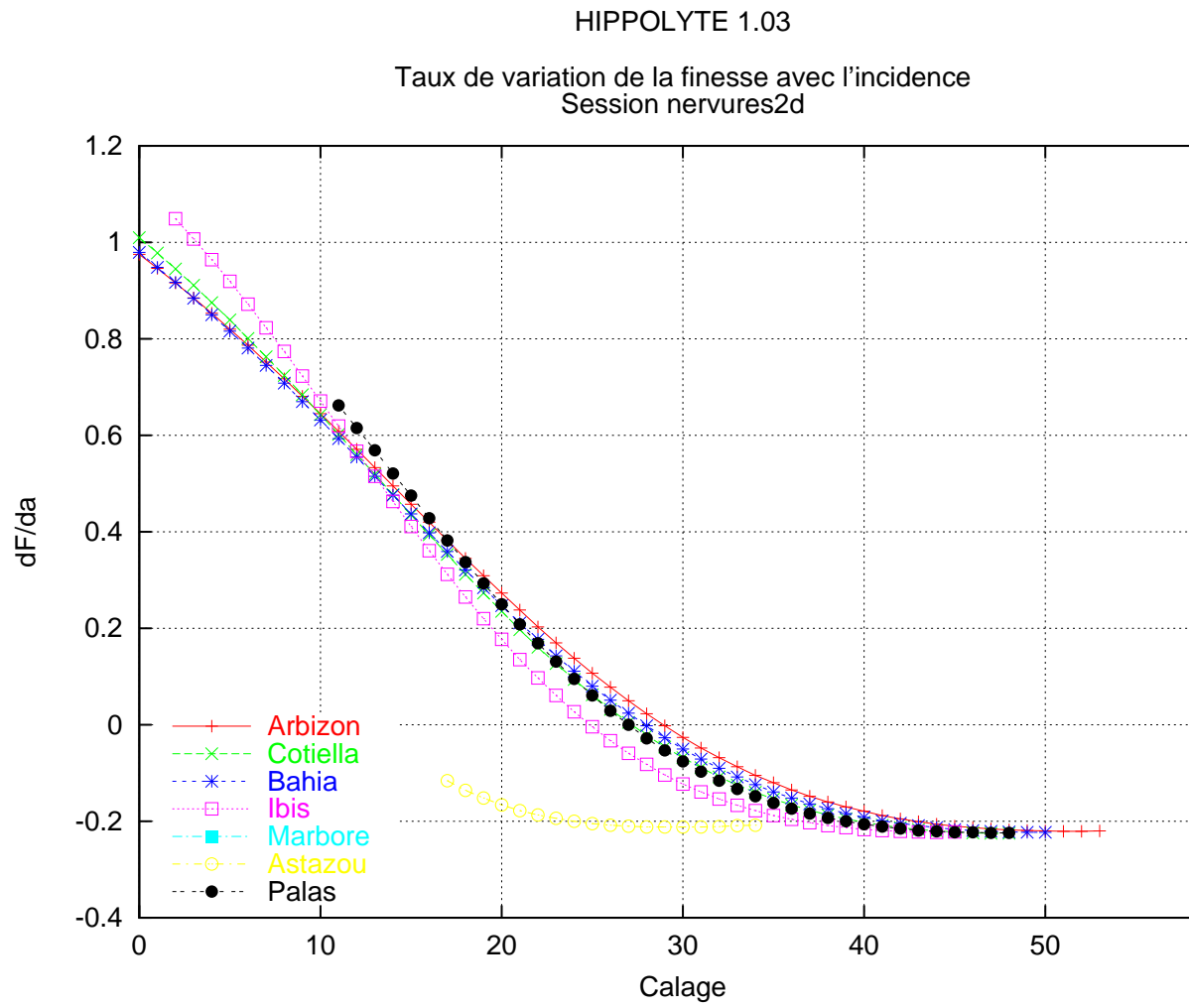


2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session nervures2d

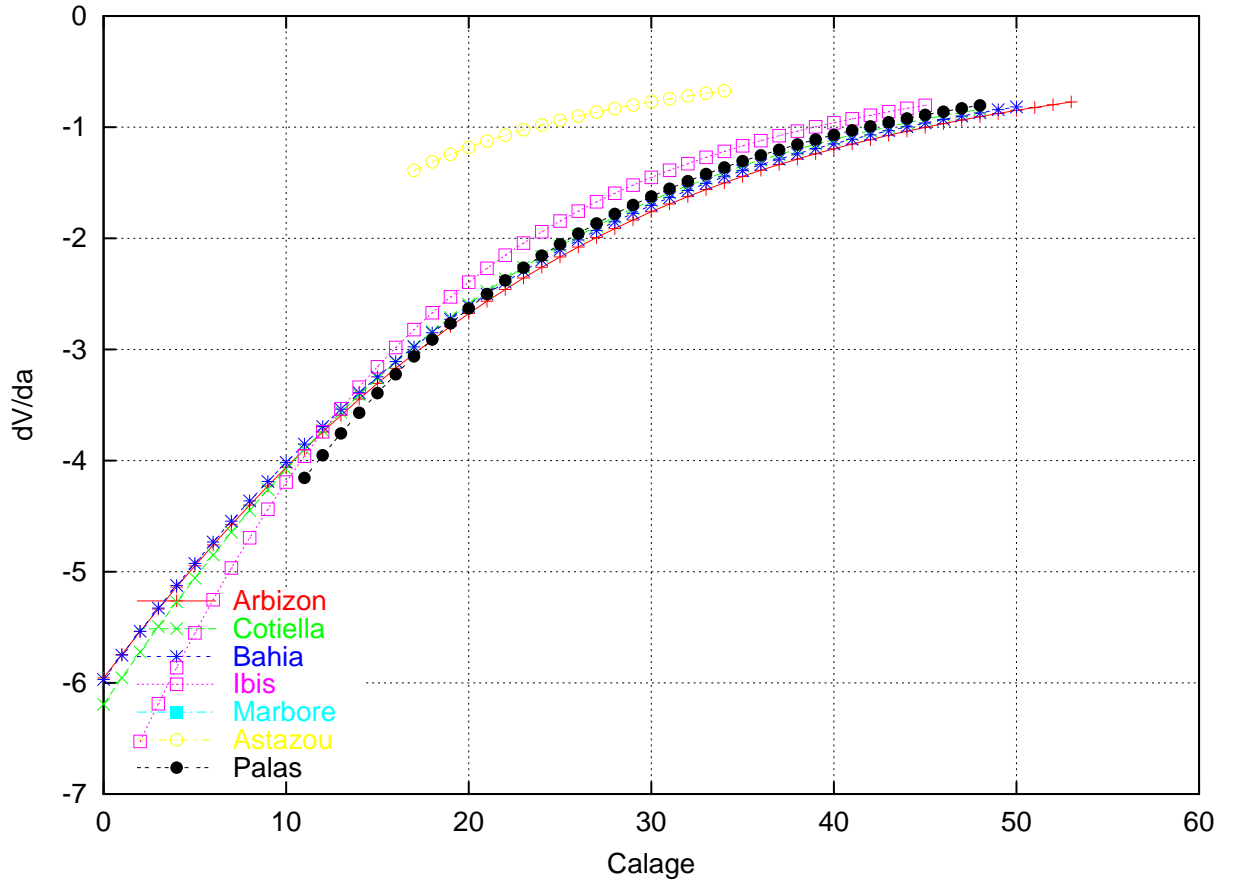




2.3 Influence du profil dans la famille Nervures

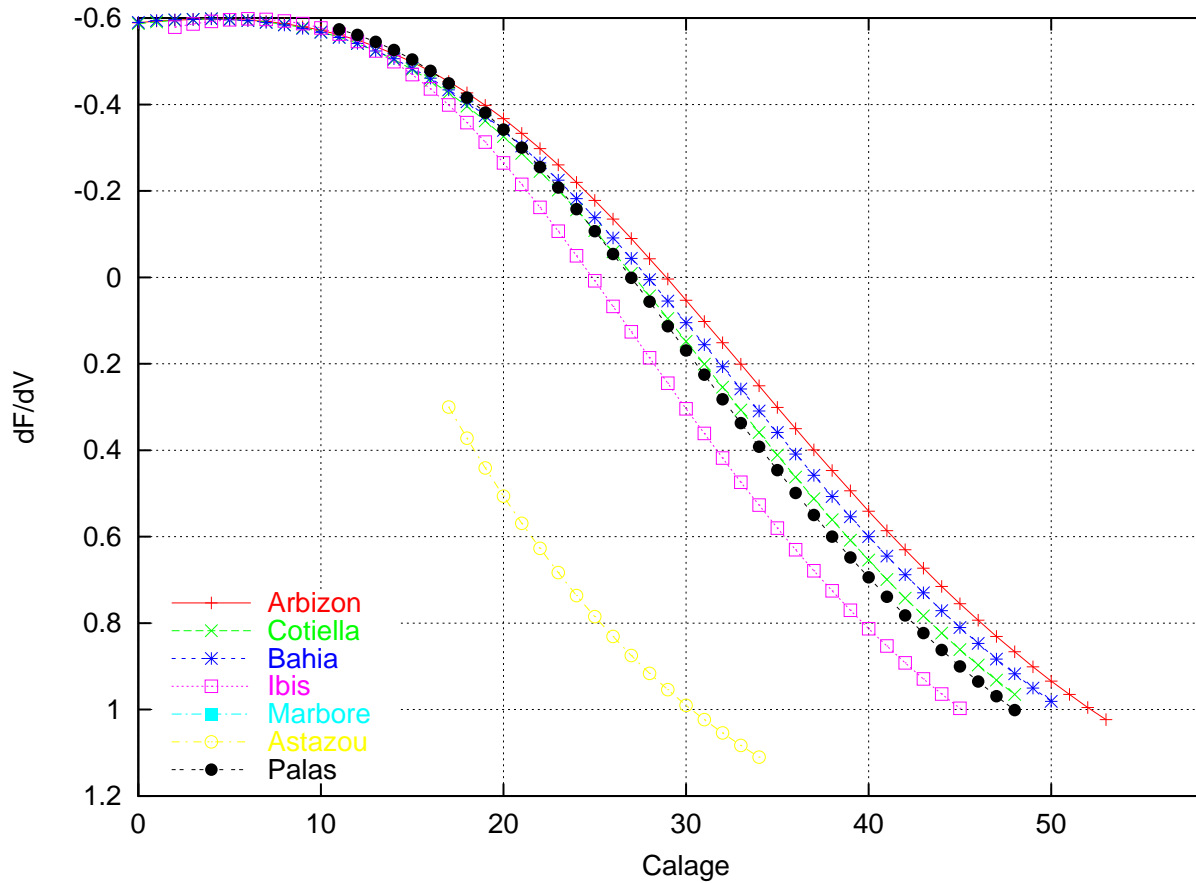
HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session nervures2d



HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session nervures2d



2.4 Influence de la longueur du suspentage

2.4.1 Profil à centrage avant : Kenya

Voici le fichier longueur_suspentes.eqi :

```

NOMBRE DE CONFIG          3

#je fais varier la longueur du suspentage, profil centré avant (Kenya)
#le SCx des suspentes varie en proportion : 7 m --> SCxs=0.5
CONFIG1
  FICHER D'ENTREE          kenya.lis
  LONGUEUR DU SUSPENTAGE  5.5
  SCX DU SUSPENTAGE       0.393
  NOM DE LA VOILE         Kenya_s=5.5

```

2.4 Influence de la longueur du suspentage

CONFIG2

FICHER D'ENTREE kenya.lis
LONGUEUR DU SUSPENTAGE 6.5
SCX DU SUSPENTAGE 0.46
NOM DE LA VOILE Kenya_s=7.5

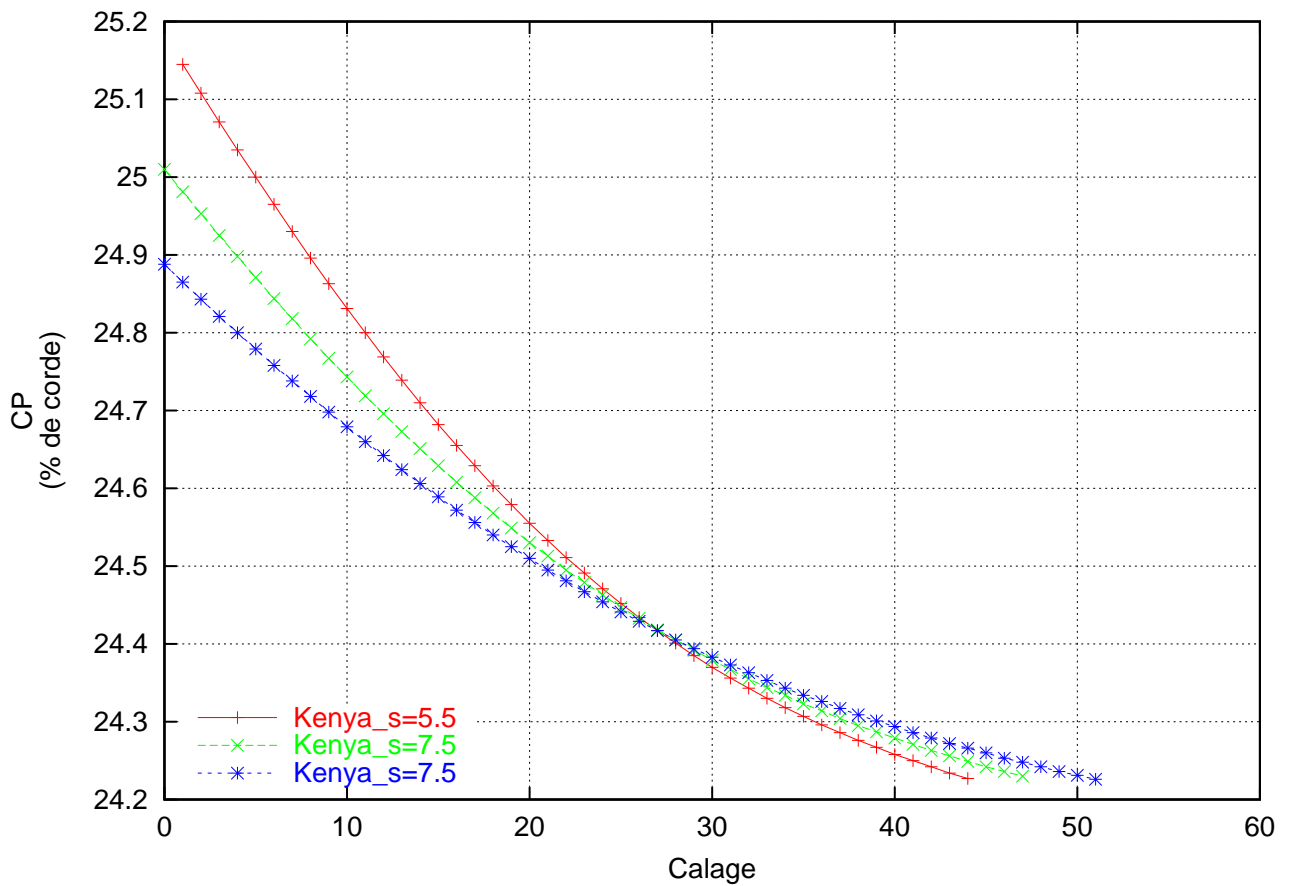
CONFIG3

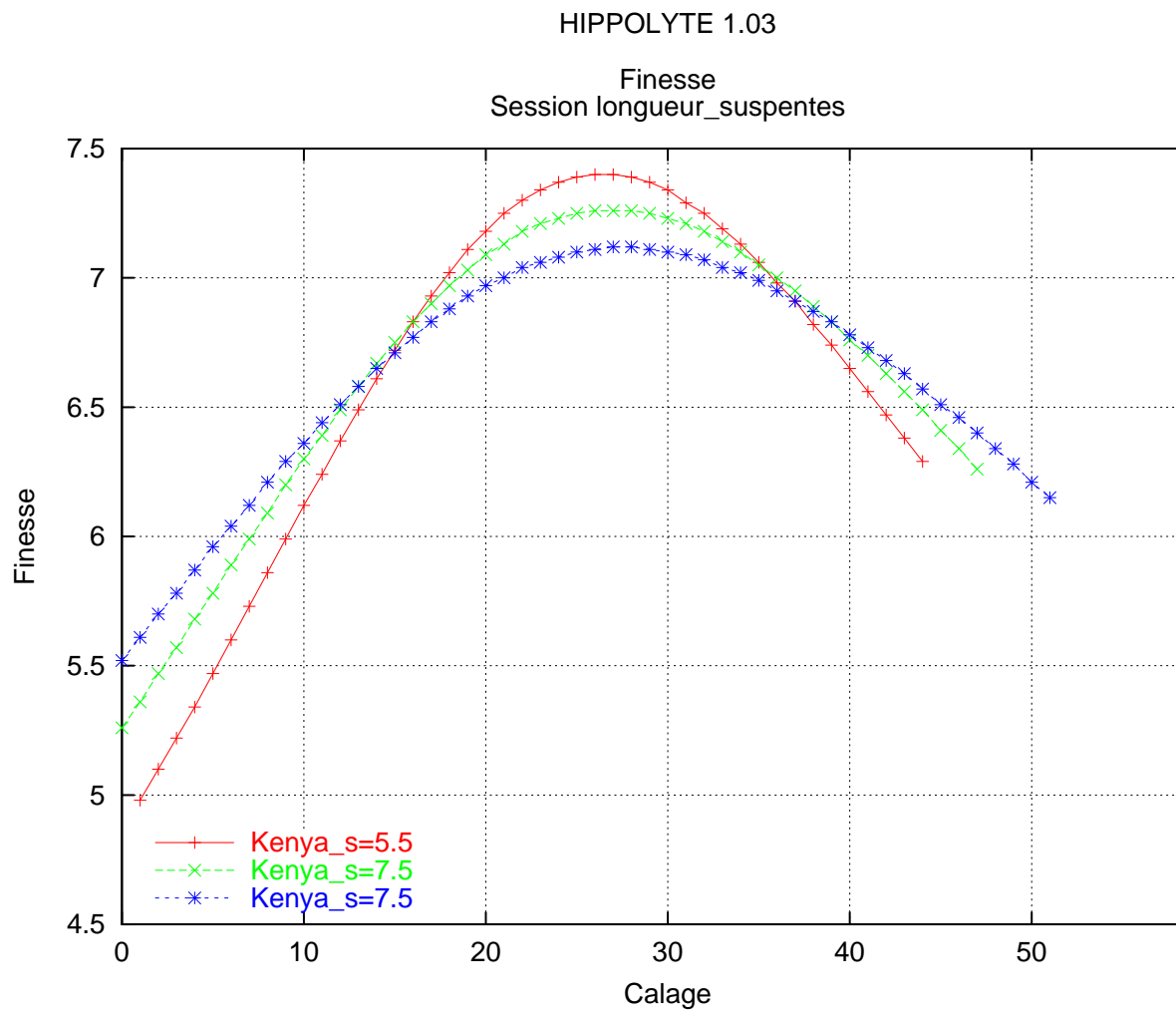
FICHER D'ENTREE kenya.lis
LONGUEUR DU SUSPENTAGE 7.5
SCX DU SUSPENTAGE 0.536
NOM DE LA VOILE Kenya_s=7.5

END

HIPPOLYTE 1.03

Position du centre de pousse
Session longueur_suspentes

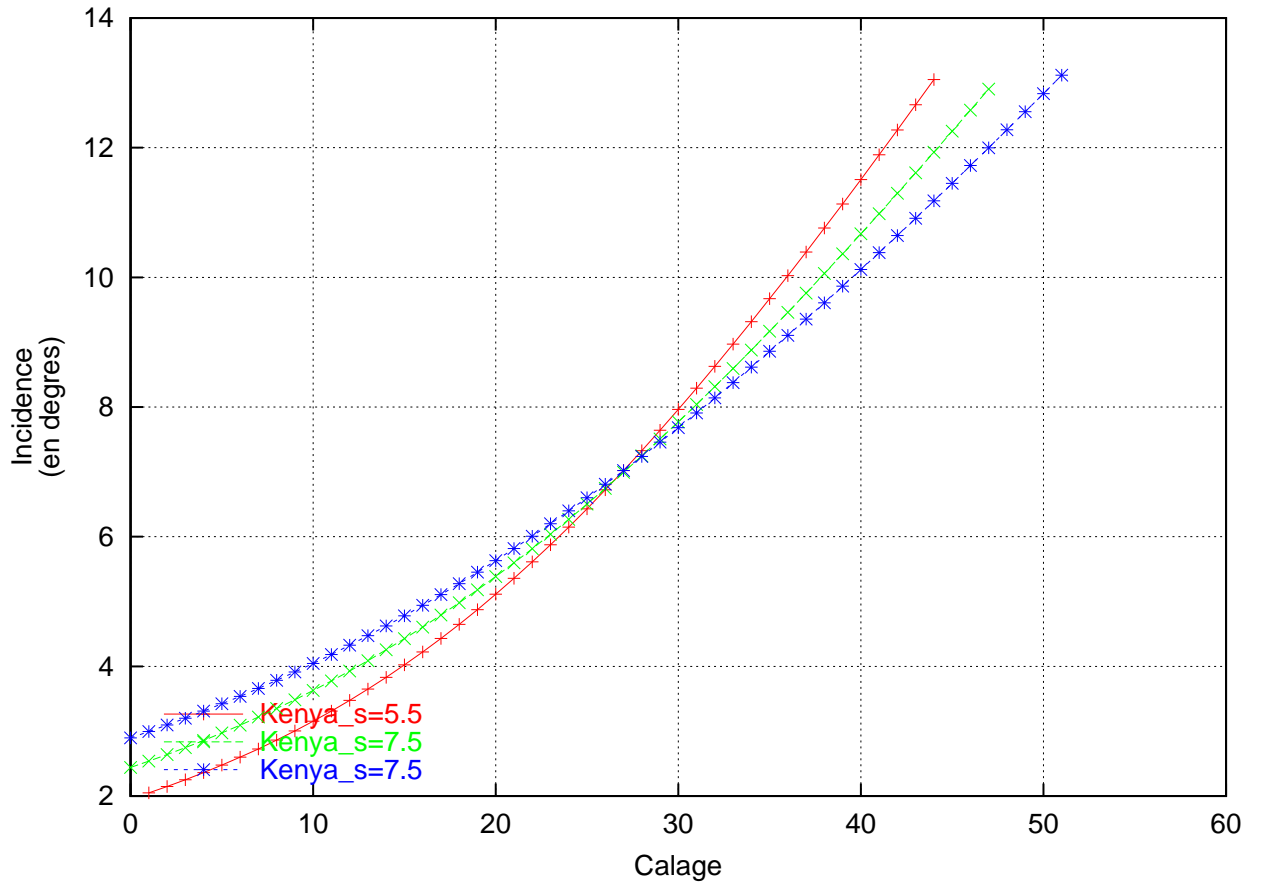


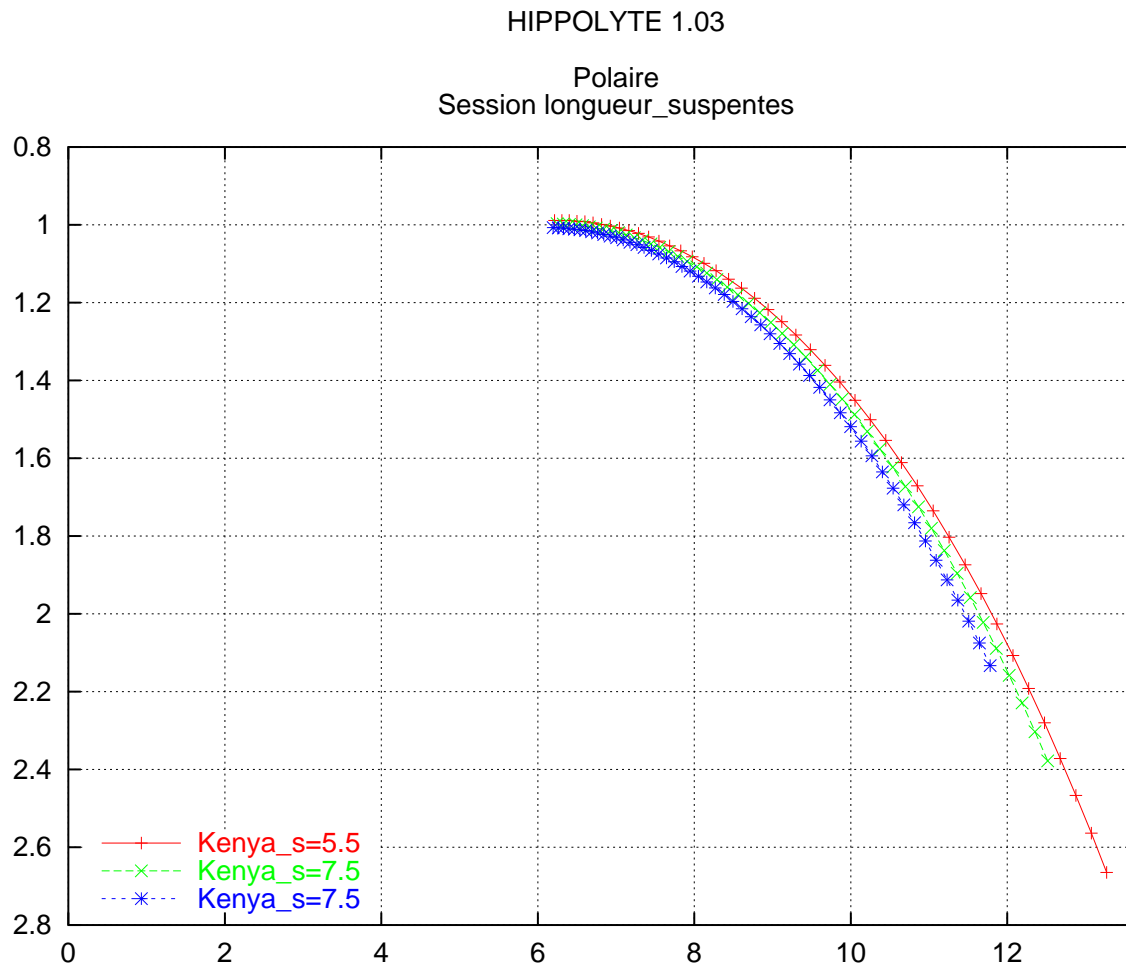


2.4 Influence de la longueur du suspentage

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session longueur_suspentes

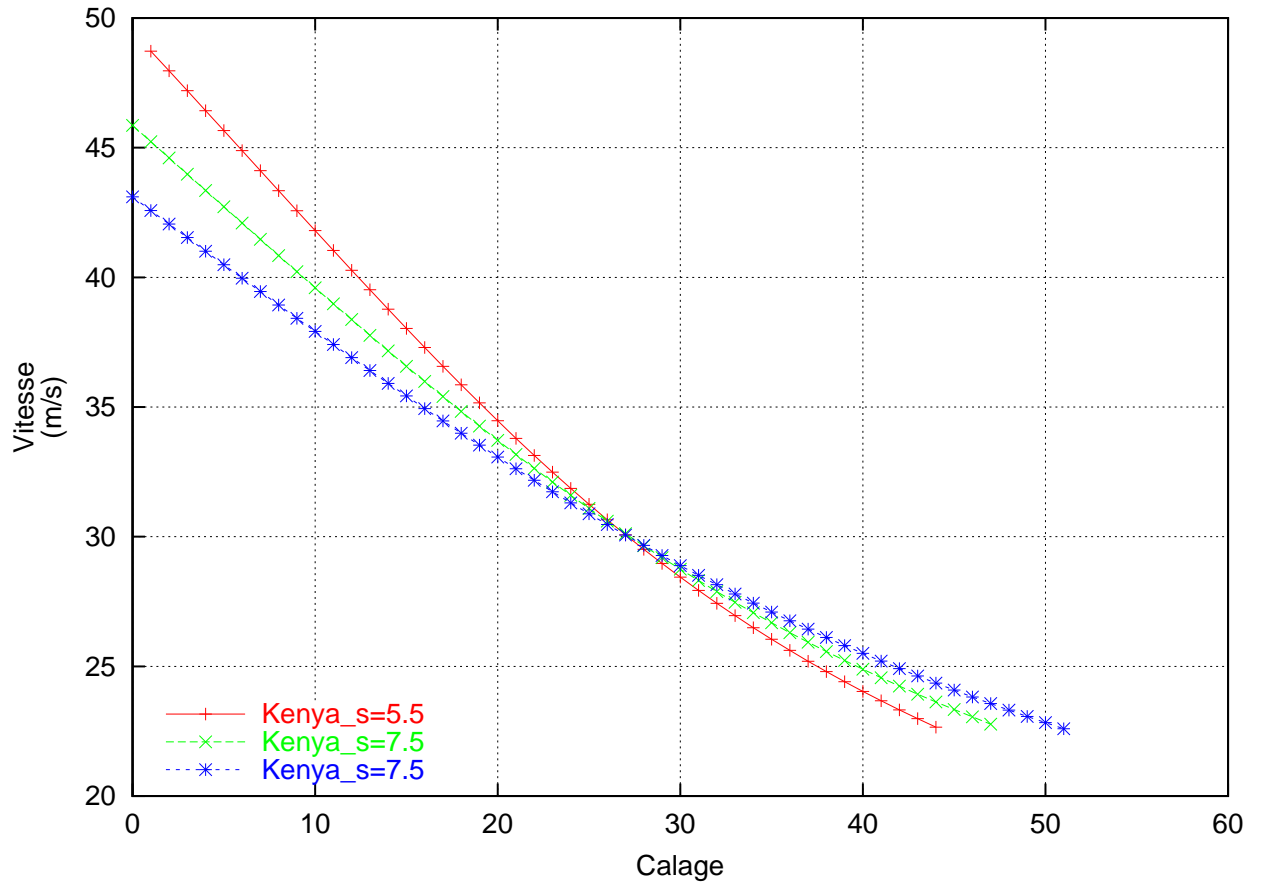


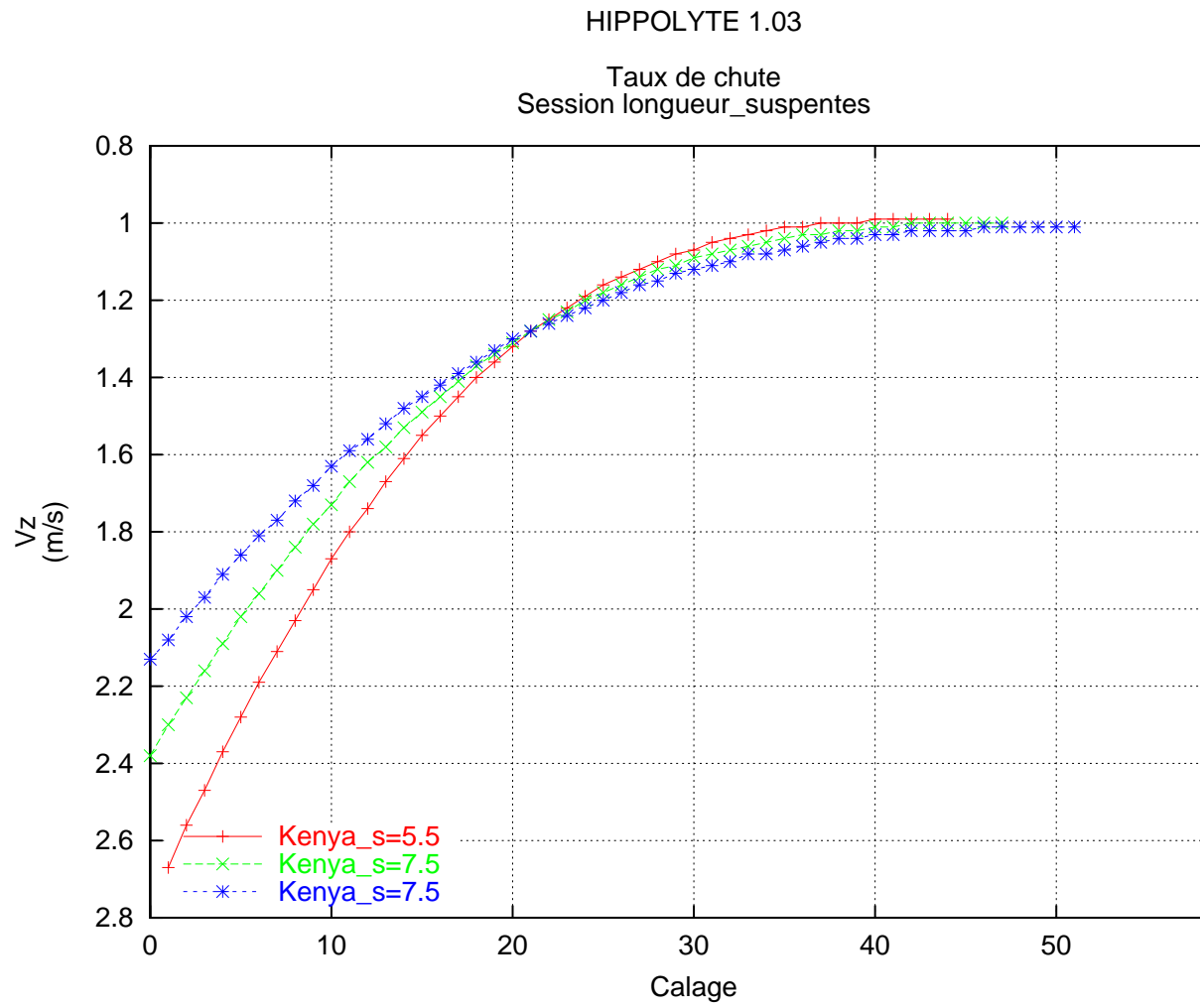


2.4 Influence de la longueur du suspentage

HIPPOLYTE 1.03

Vitesse
(m/s)
Session longueur_suspentes

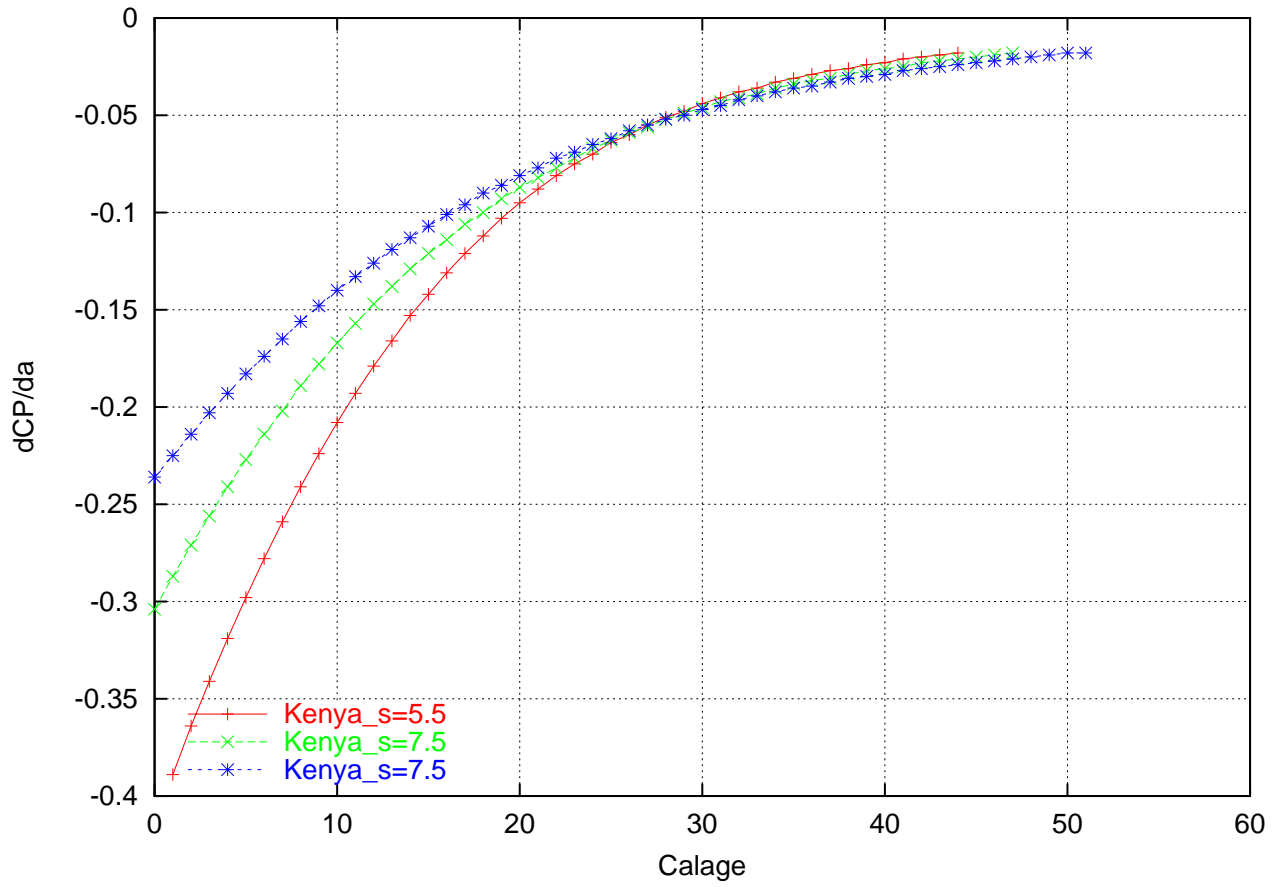




2.4 Influence de la longueur du suspentage

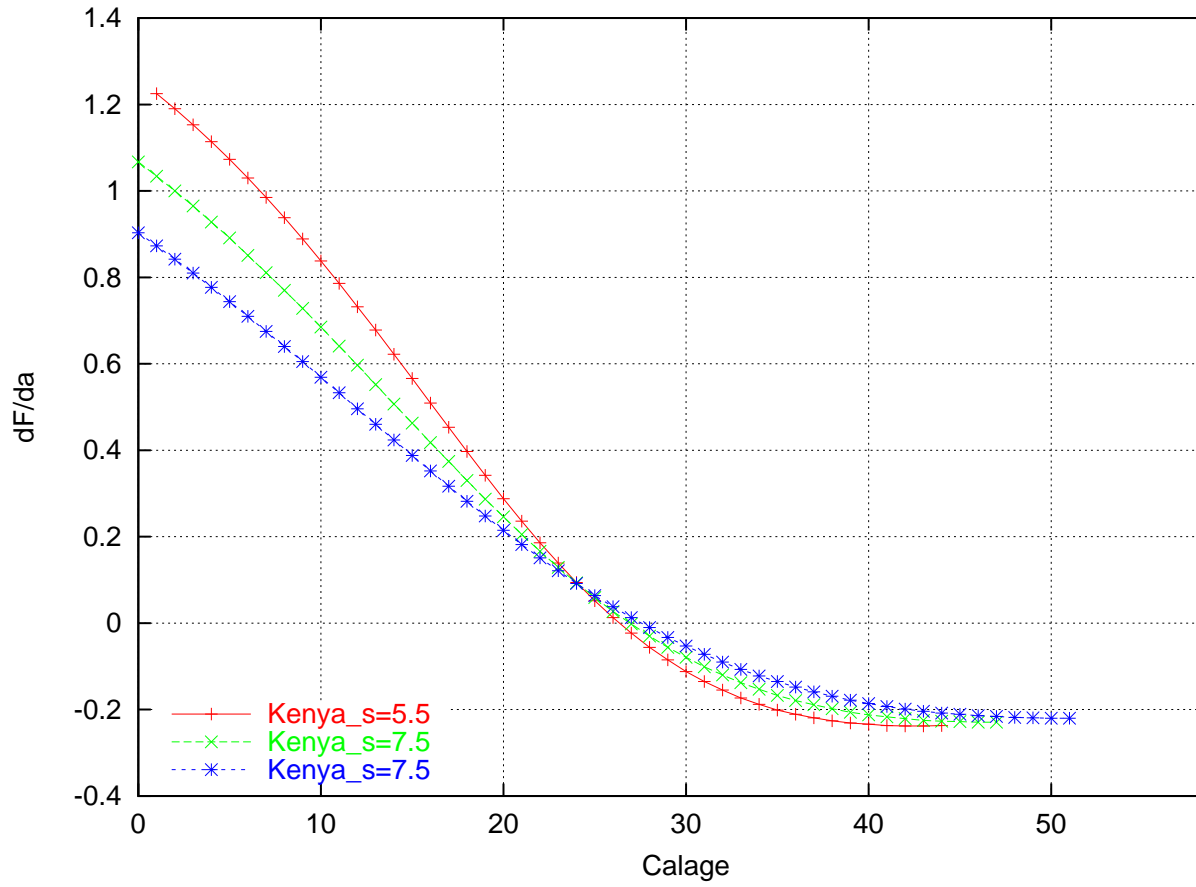
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session longueur_suspentes



HIPPOLYTE 1.03

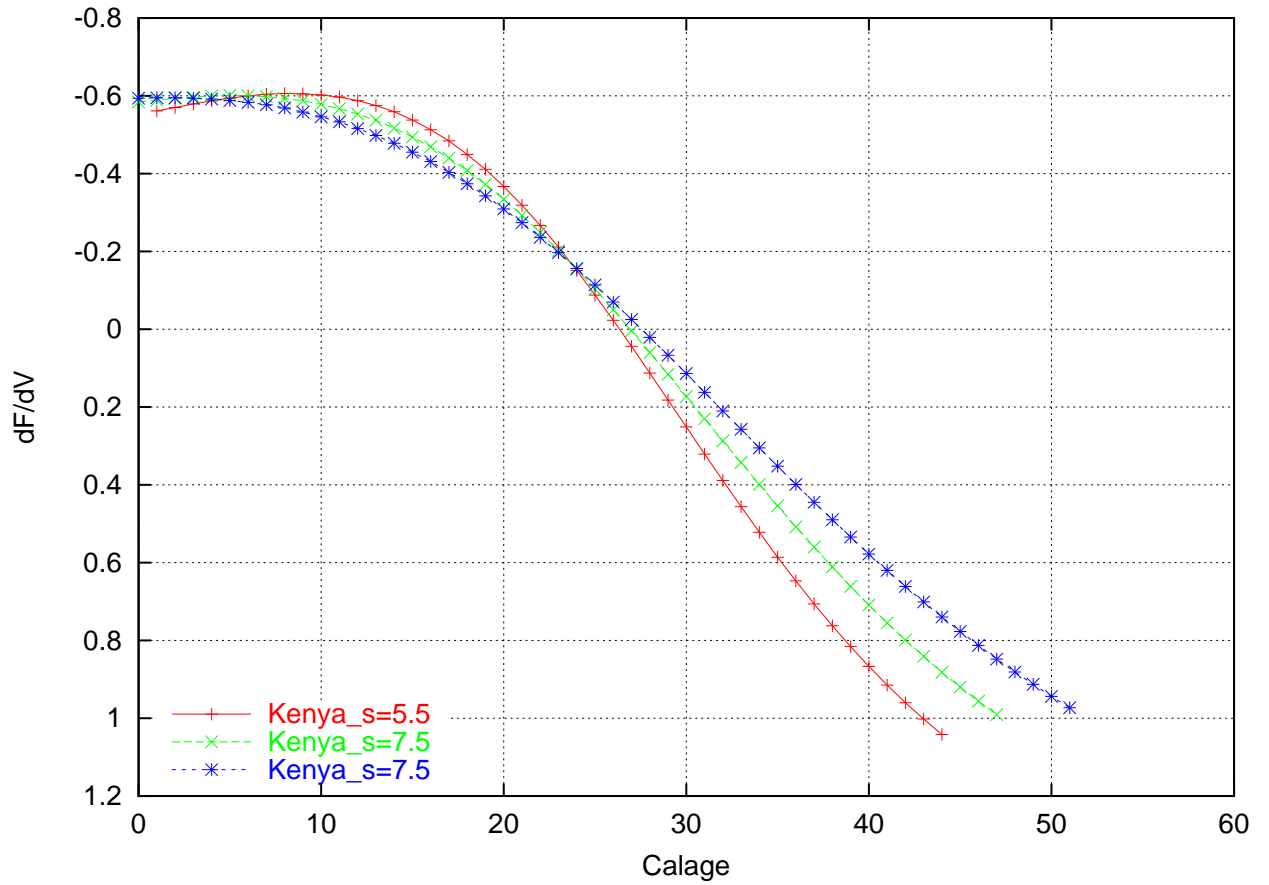
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session longueur_suspentes



2.4 Influence de la longueur du suspentage

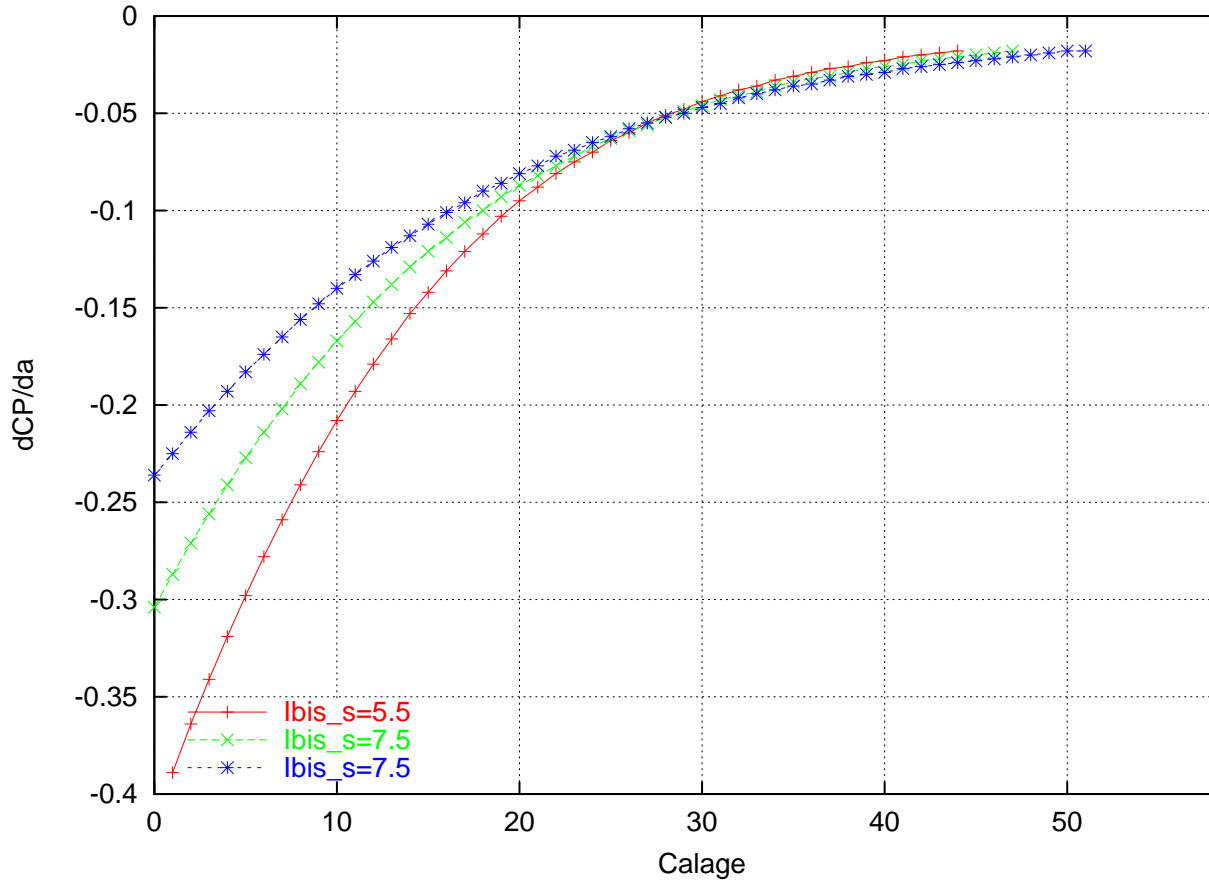
HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session longueur_suspentes



HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session longueur_suspentes1



2.4.2 Profil à centrage arrière : Ibis

NOMBRE DE CONFIG 3

#je fais varier la longueur du suspentage, profil centre arriere (Ibis)

#le SCx des suspentes varie en proportion : 7 m --> SCxs=0.5

CONFIG1

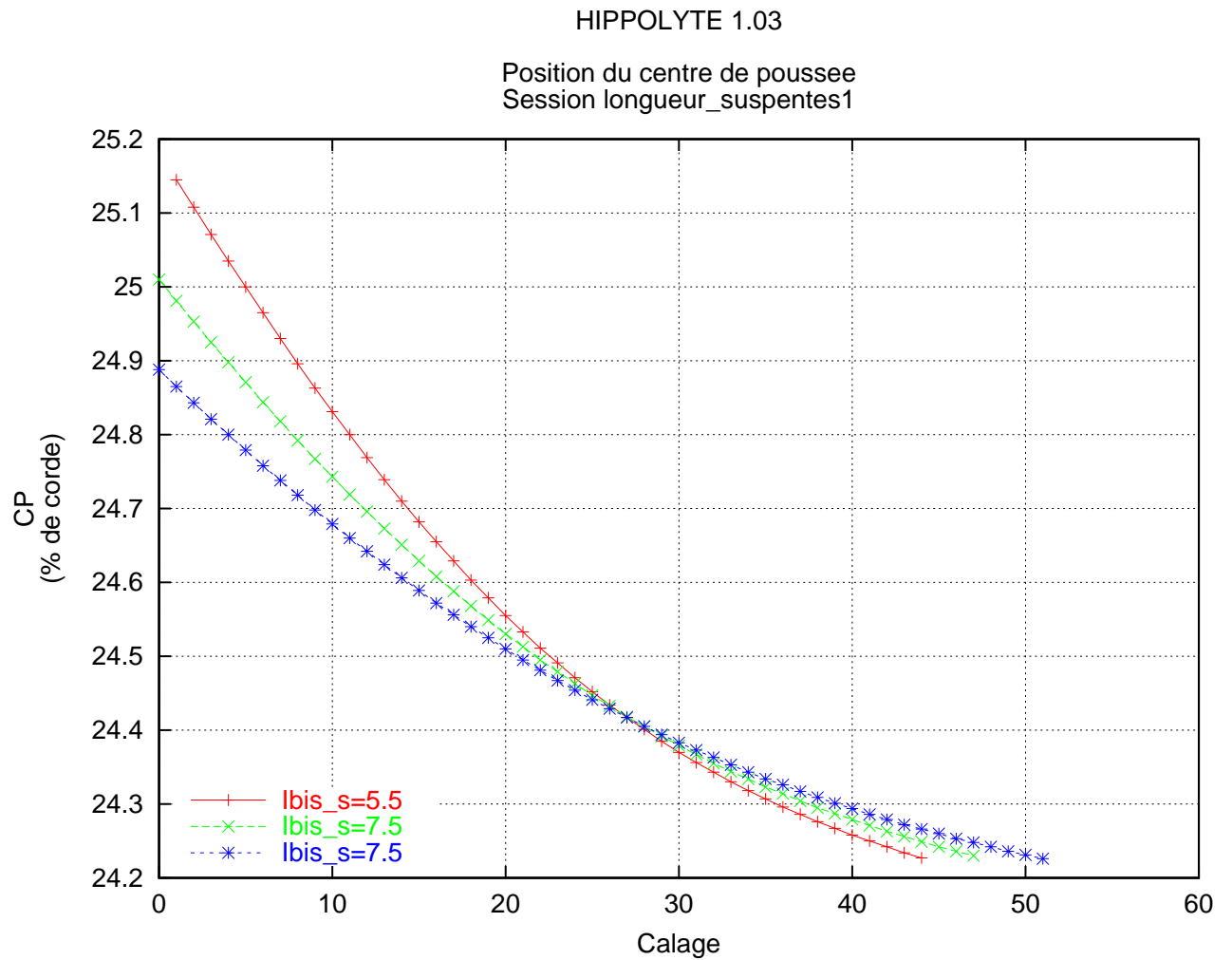
FICHIER D'ENTREE	ibis.lis
LONGUEUR DU SUSPENTAGE	5.5
SCX DU SUSPENTAGE	0.393
NOM DE LA VOILE	Ibis_s=5.5

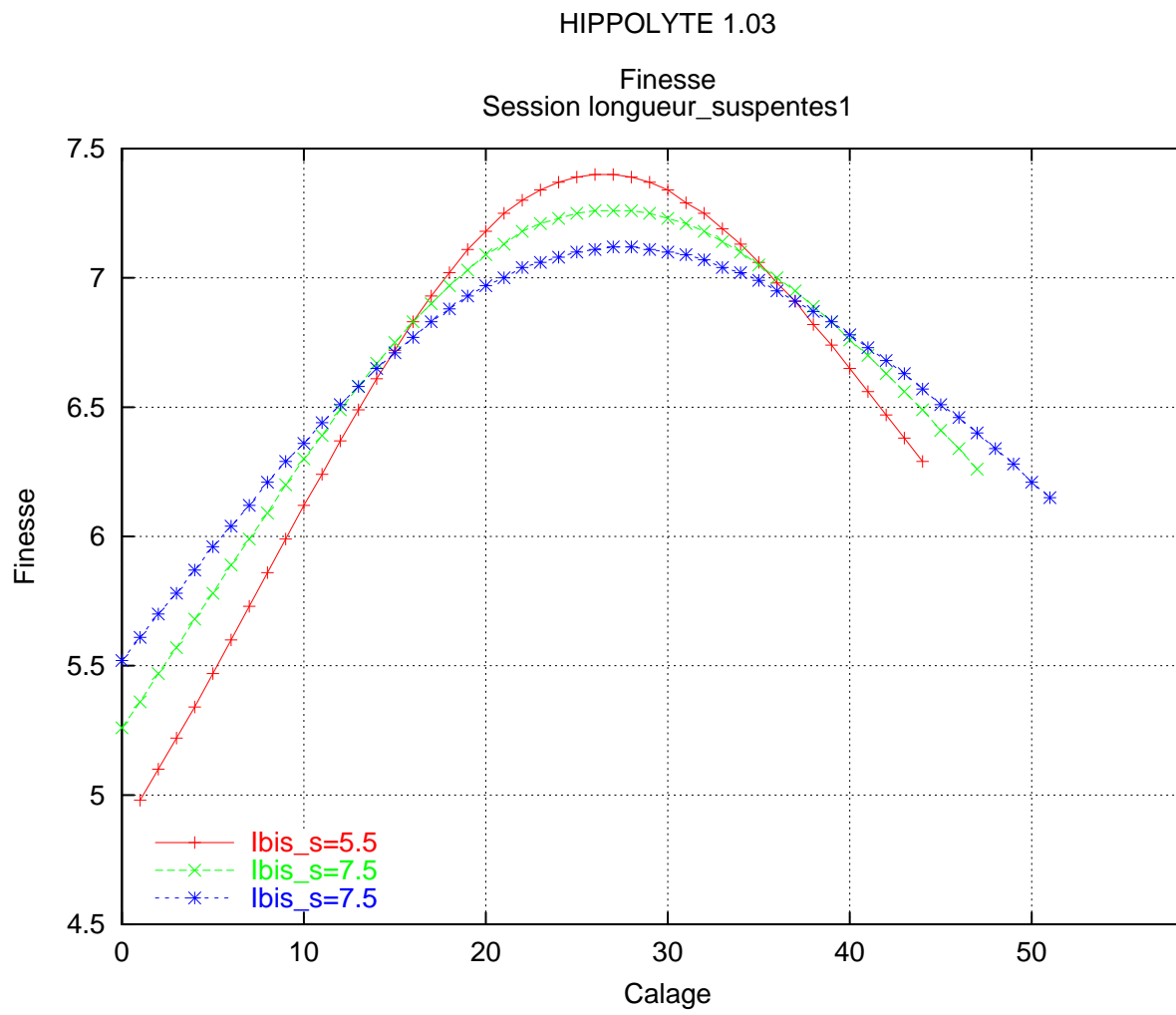
CONFIG2

FICHIER D'ENTREE	ibis.lis
LONGUEUR DU SUSPENTAGE	6.5
SCX DU SUSPENTAGE	0.46

2.4 Influence de la longueur du suspentage

```
NOM DE LA VOILE      Ibis_s=7.5
CONFIG3
FICHER D'ENTREE      ibis.lis
LONGUEUR DU SUSPENTAGE 7.5
SCX DU SUSPENTAGE    0.536
NOM DE LA VOILE      Ibis_s=7.5
END
```

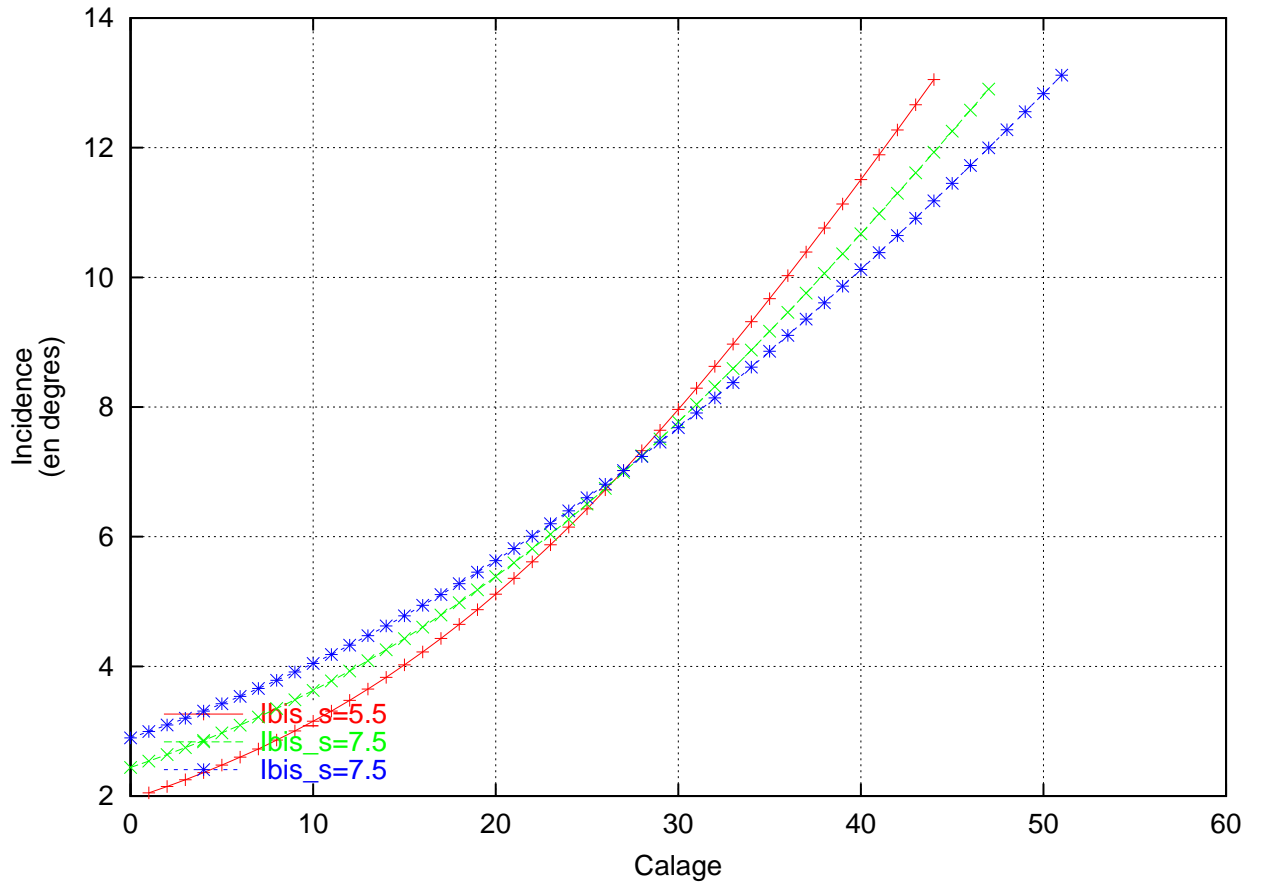


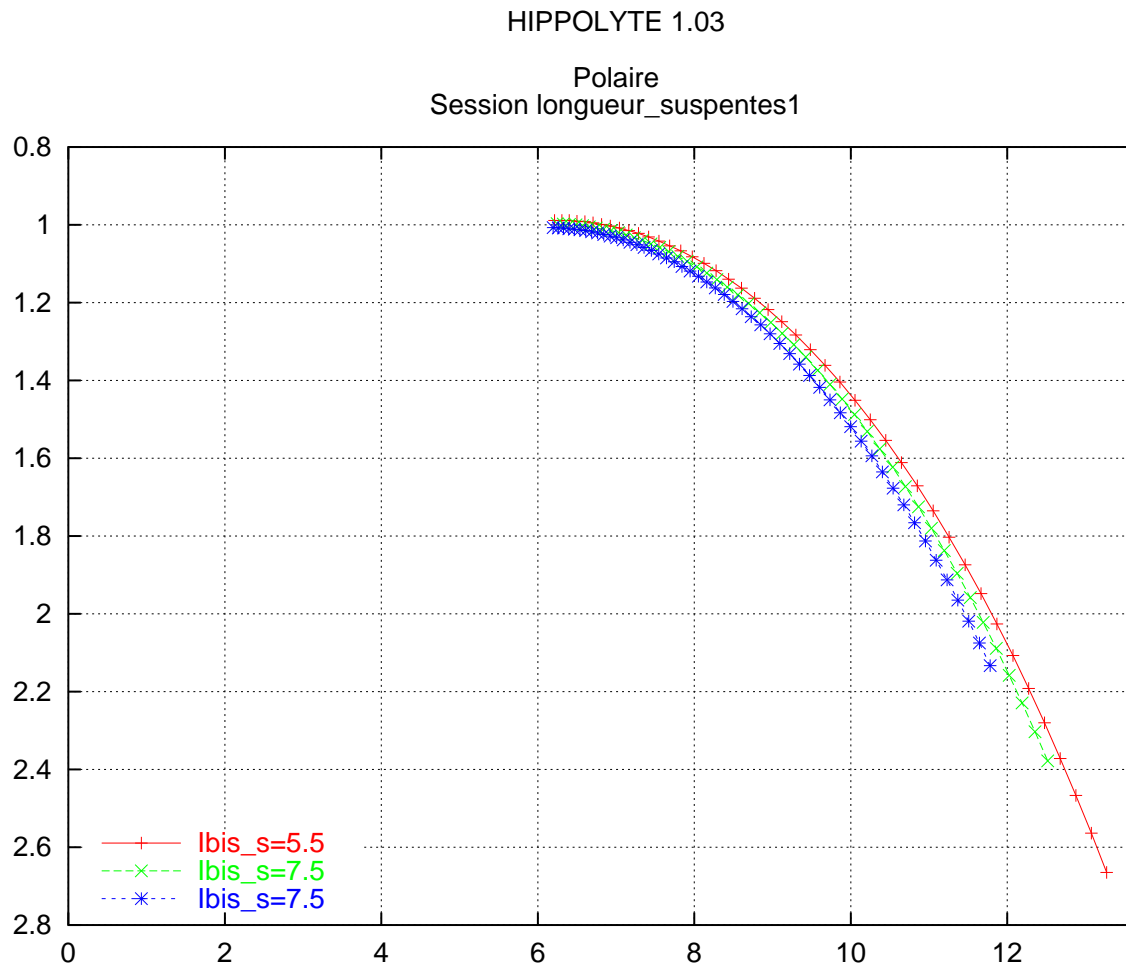


2.4 Influence de la longueur du suspentage

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session longueur_suspentes1

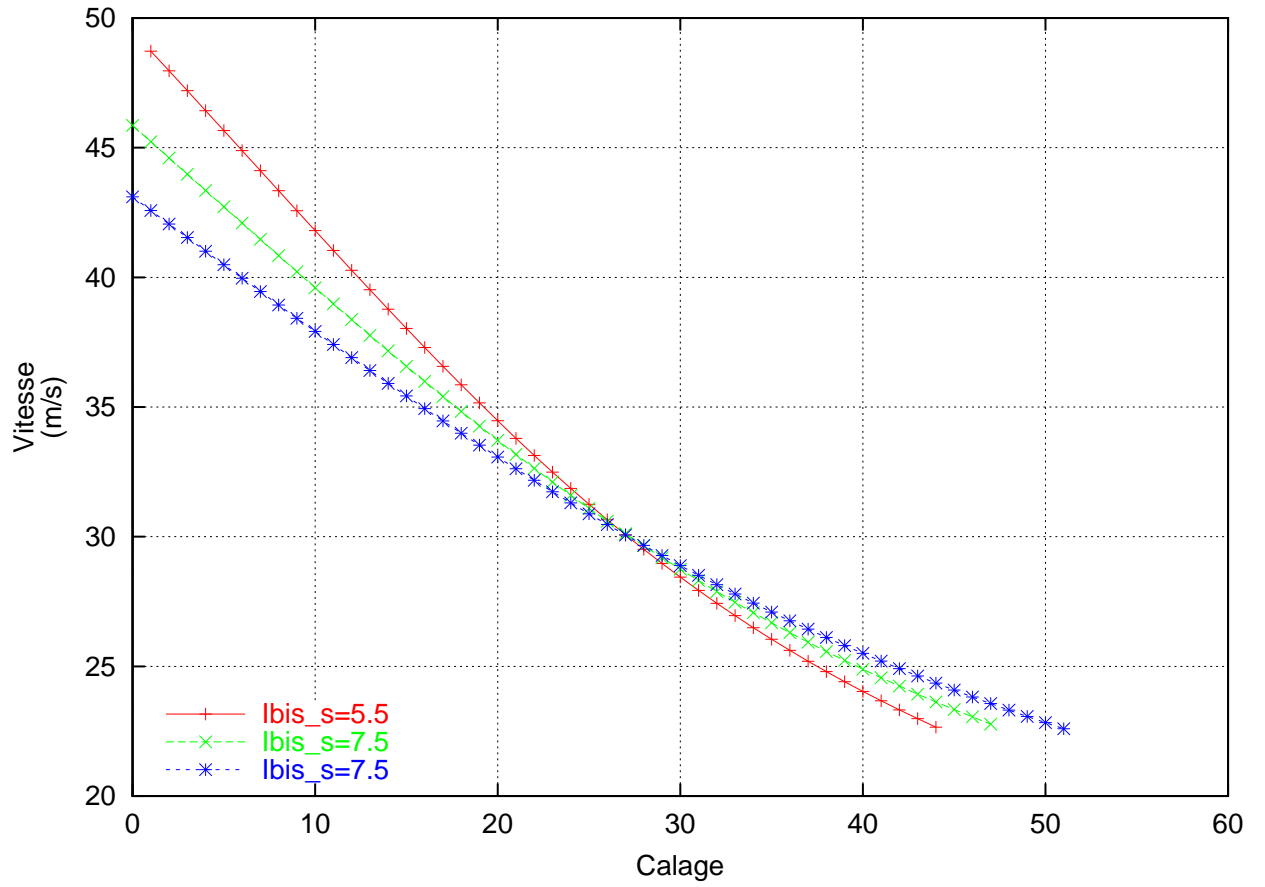


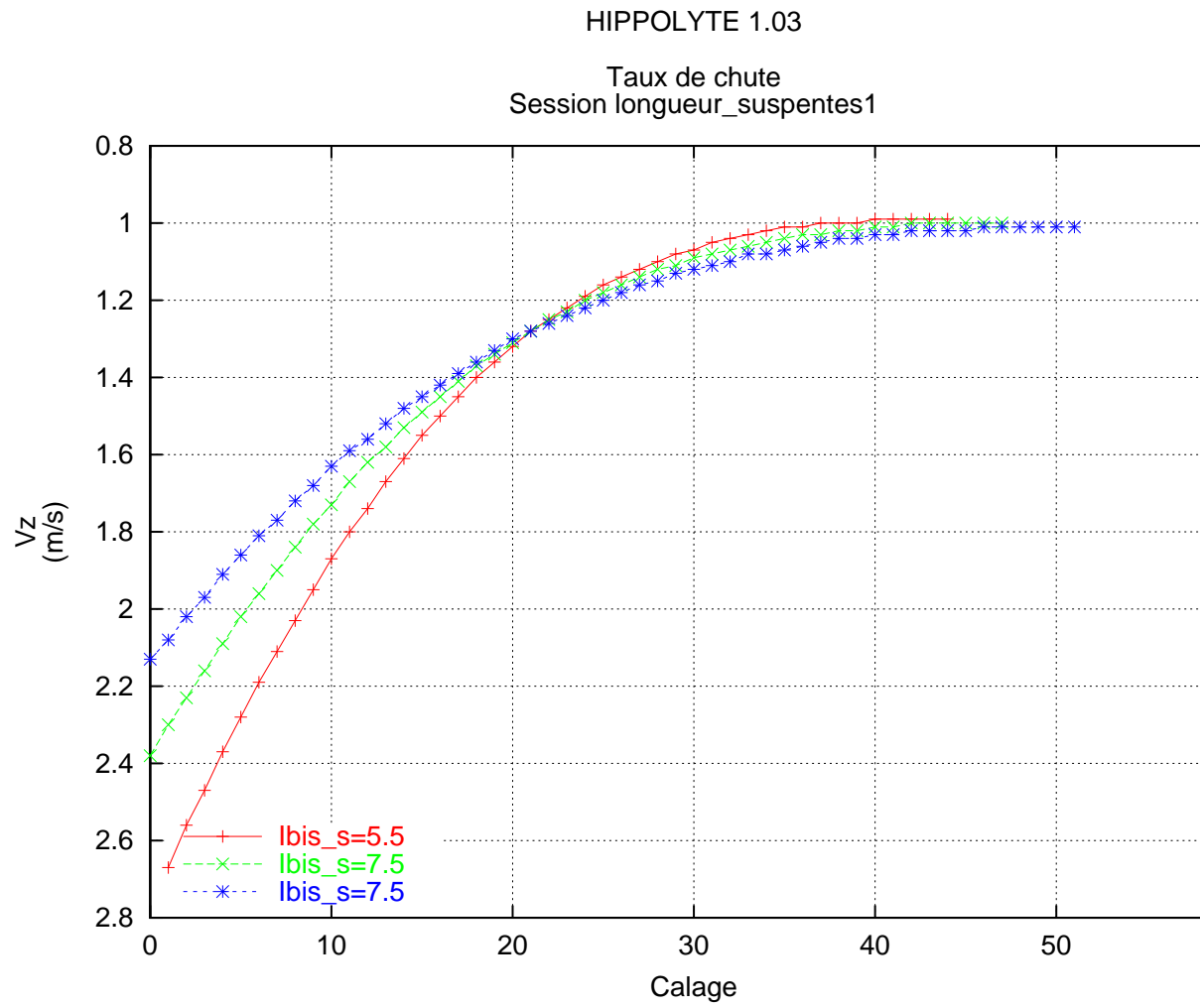


2.4 Influence de la longueur du suspentage

HIPPOLYTE 1.03

Vitesse
(m/s)
Session longueur_suspentes1

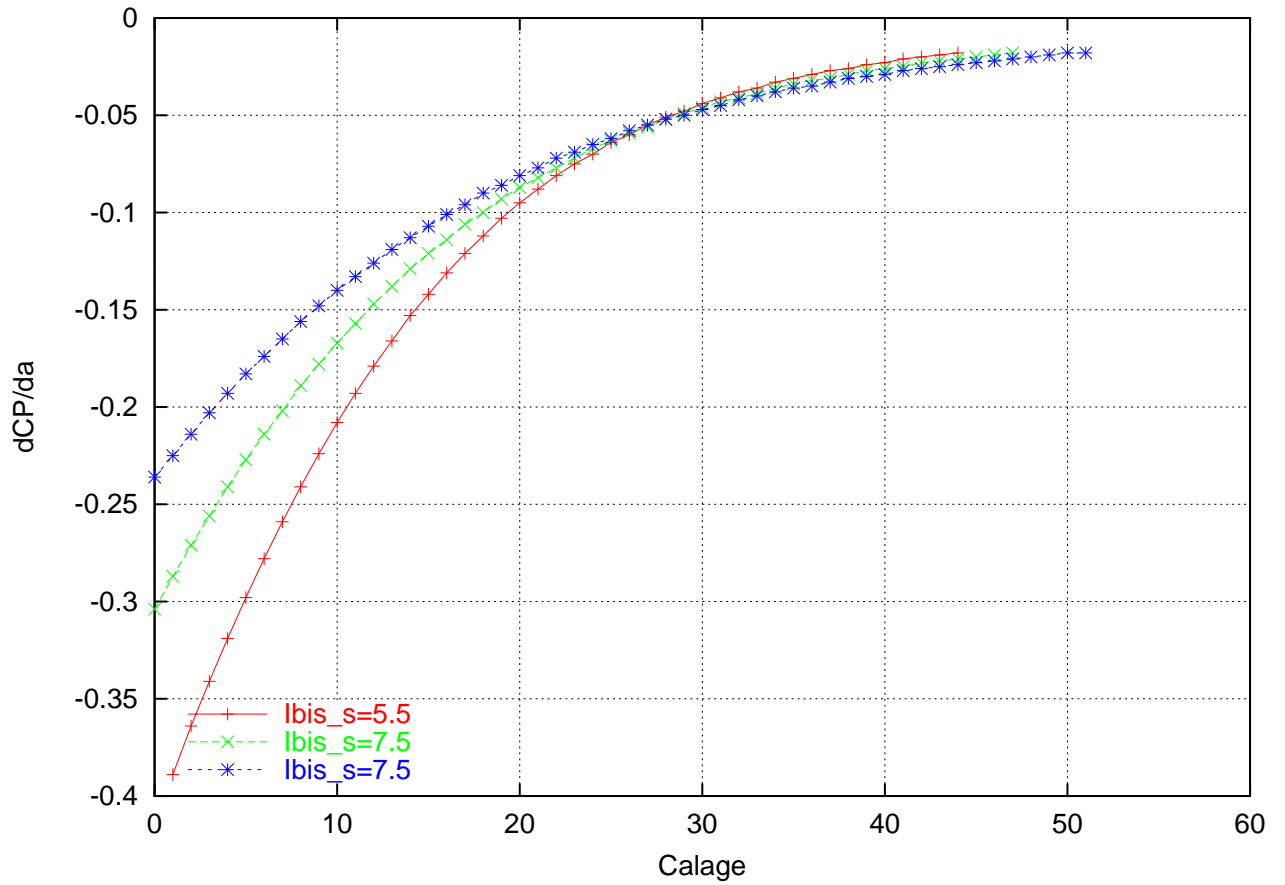




2.4 Influence de la longueur du suspentage

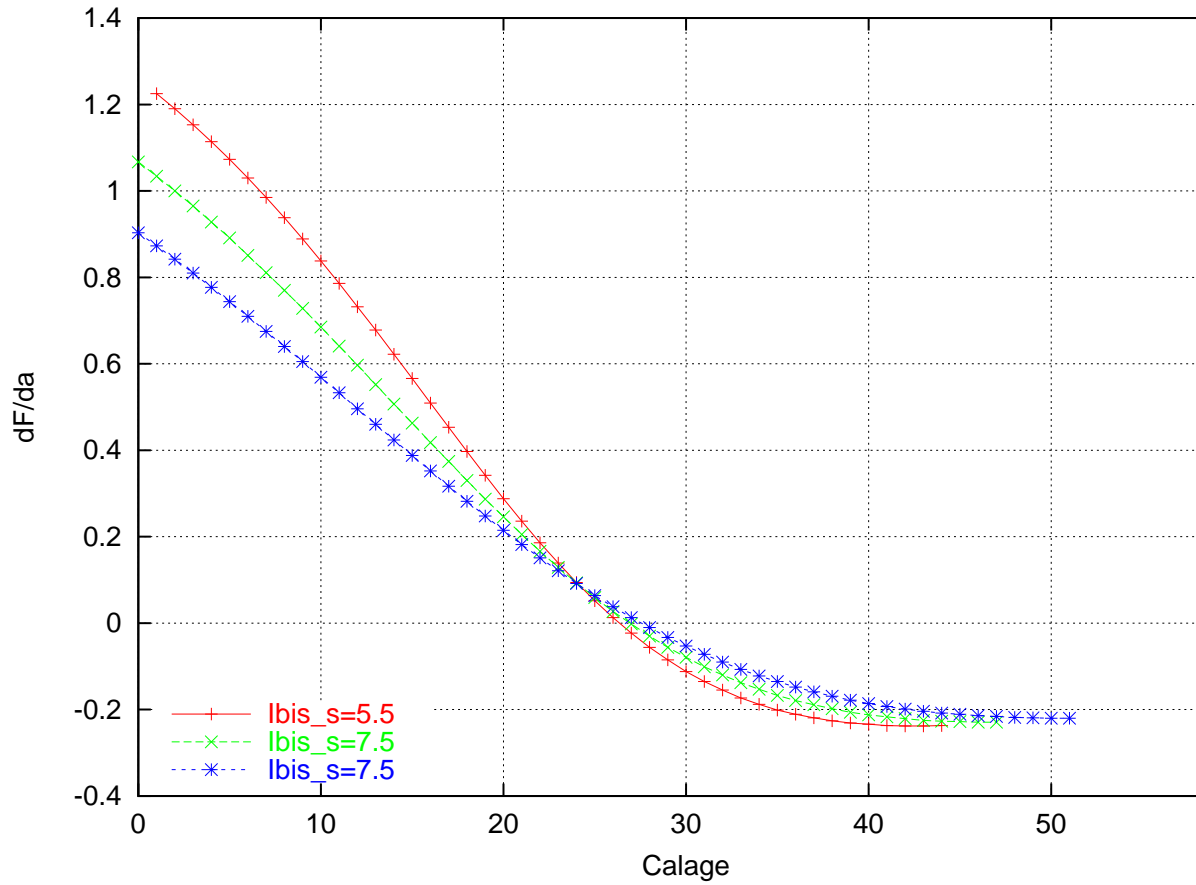
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session longueur_suspentes1



HIPPOLYTE 1.03

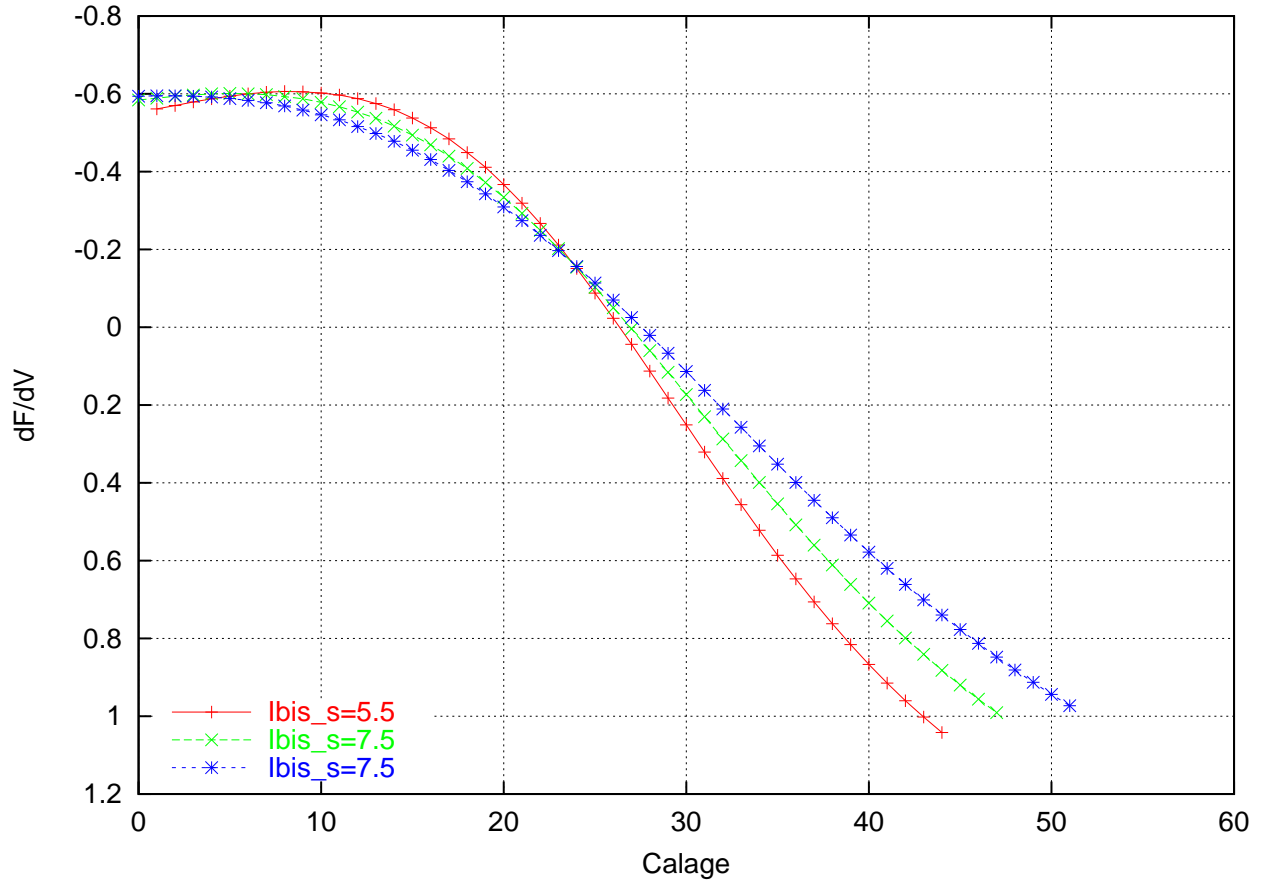
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session longueur_suspentes1

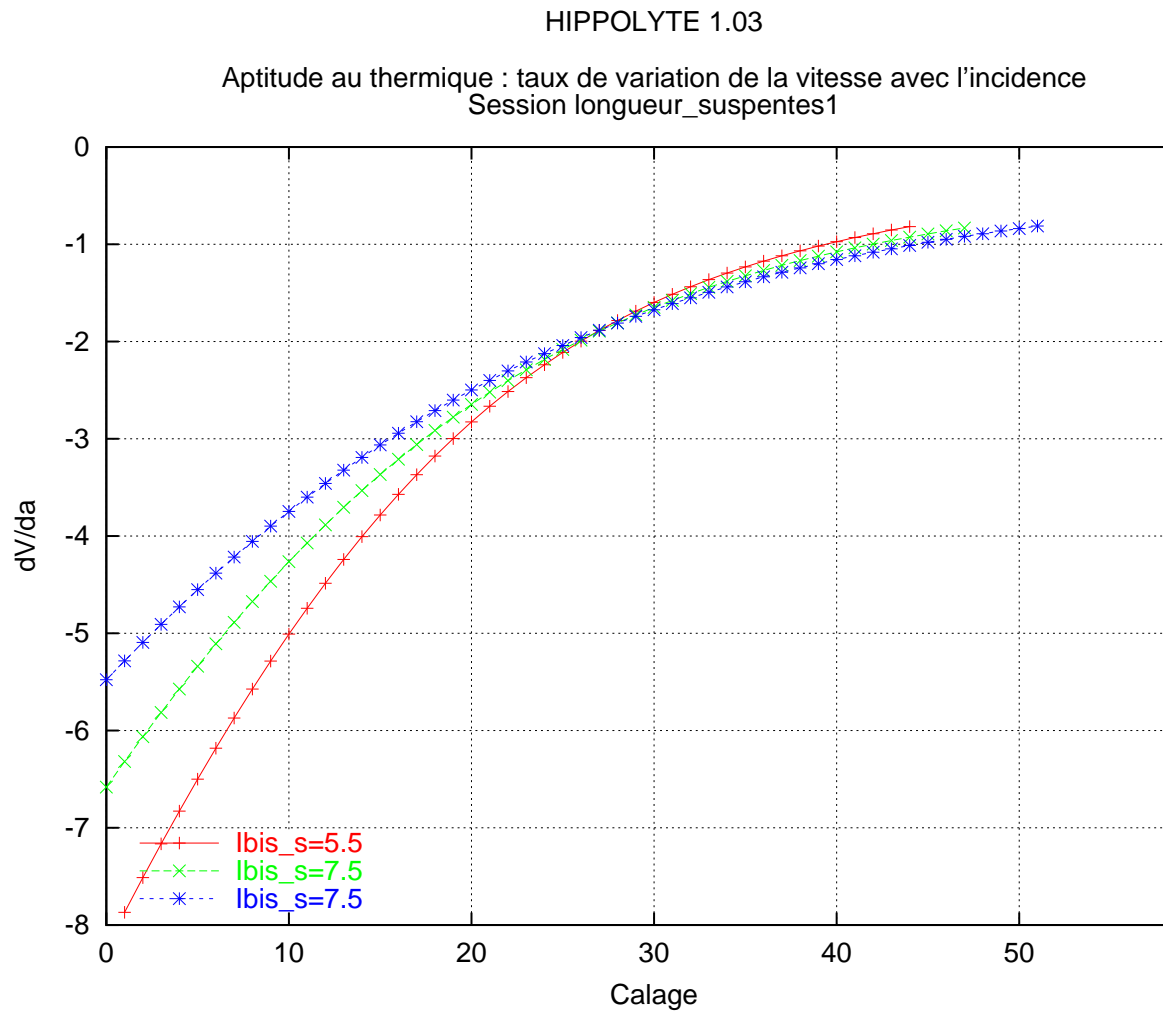


2.4 Influence de la longueur du suspentage

HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session longueur_suspentes1





2.5 Influence de l'allongement

Le fichier allongement.eqi correspondant est :

NOMBRE DE CONFIG 4

#je fais varier l'allongement, de 5 à 6, profil Bahia et Kenya

CONFIG1

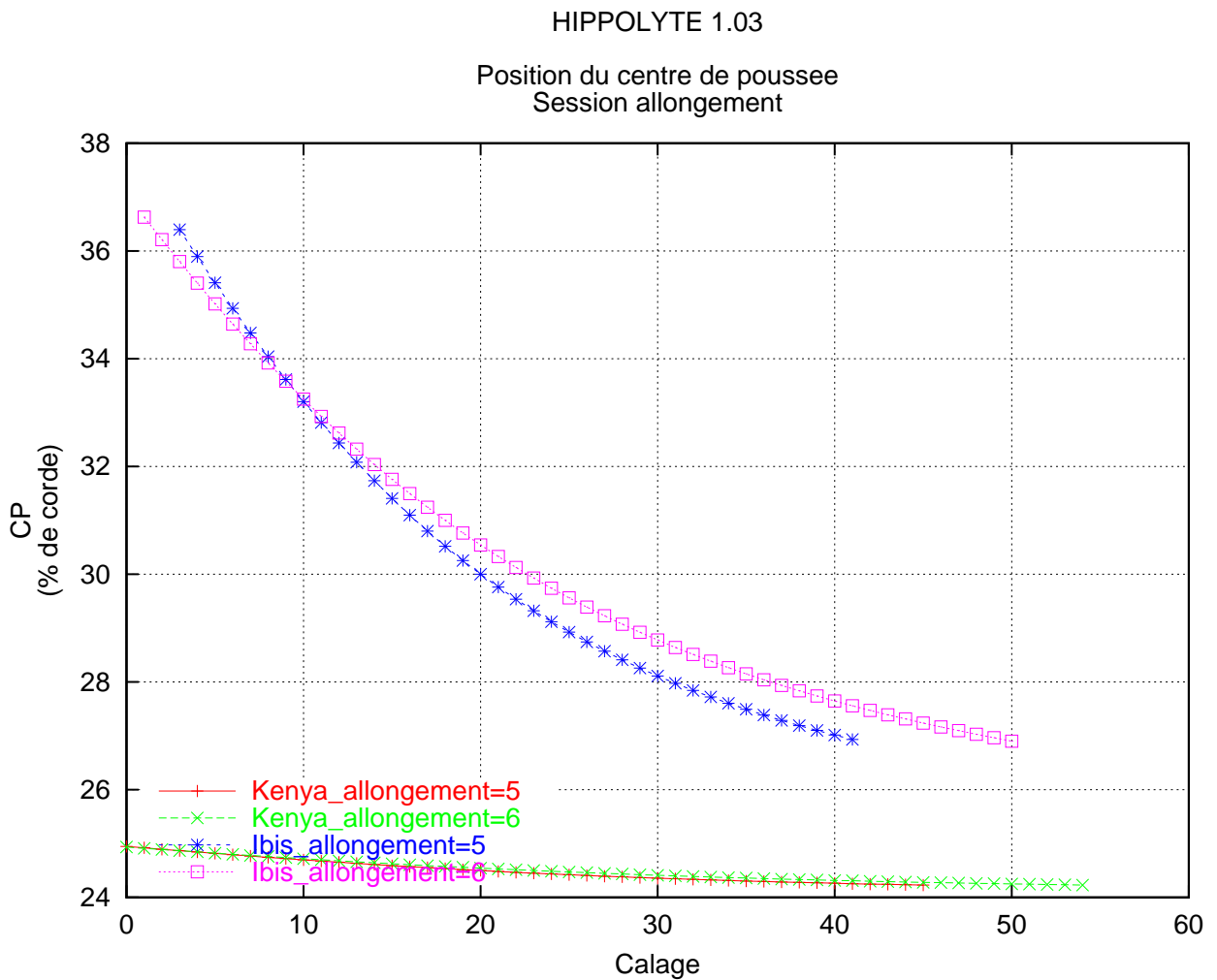
FICHER D'ENTREE kenya.lis
 NOM DE LA VOILE Kenya_allongement=5
 ALLONGEMENT DE LA VOILE 5

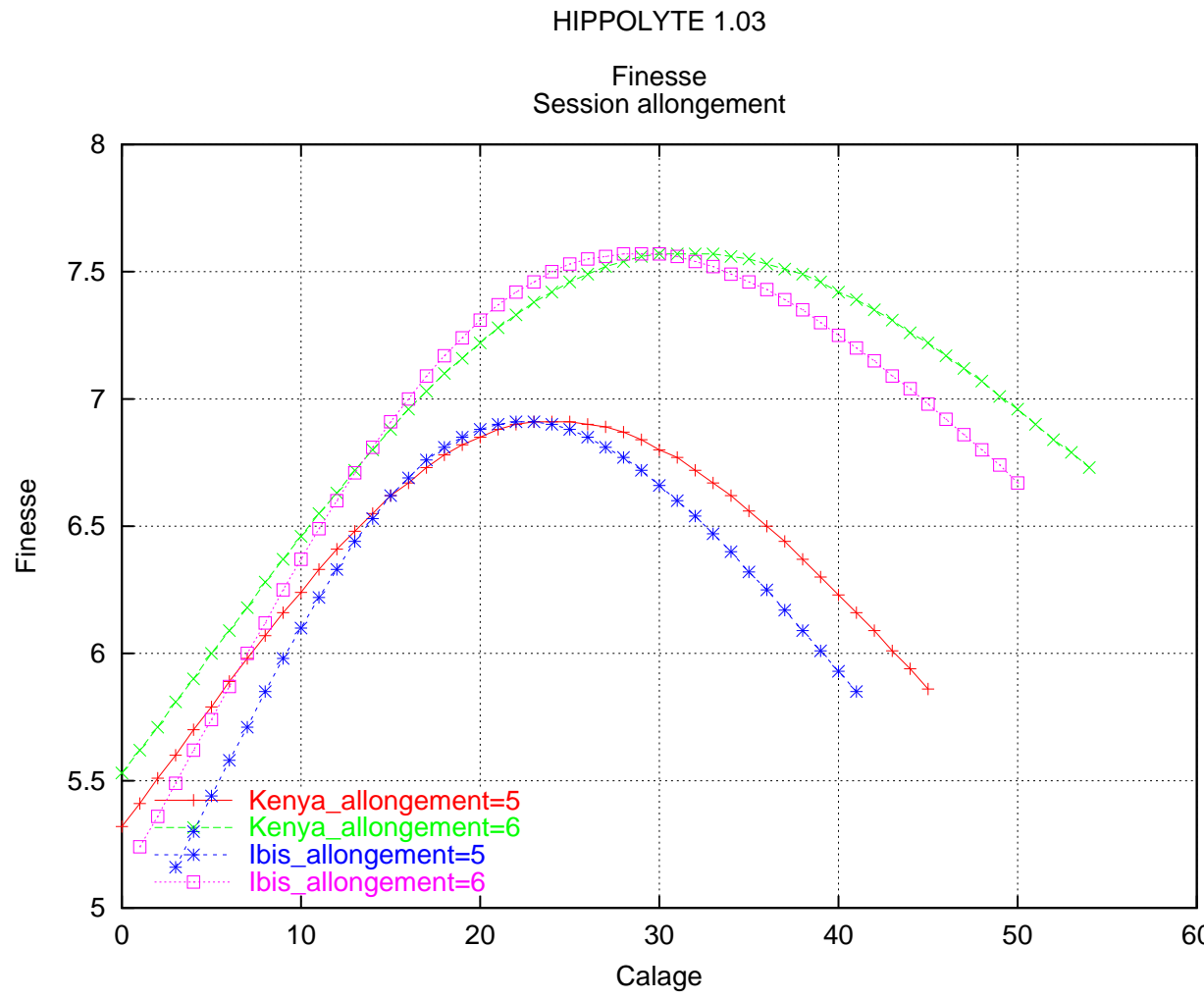
CONFIG2

FICHER D'ENTREE kenya.lis
 NOM DE LA VOILE Kenya_allongement=6

2.5 Influence de l'allongement

```
ALLONGEMENT DE LA VOILE 6
CONFIG3
FICHER D'ENTREE      ibis.lis
NOM DE LA VOILE      Ibis_allongement=5
ALLONGEMENT DE LA VOILE 5
CONFIG4
FICHER D'ENTREE      ibis.lis
NOM DE LA VOILE      Ibis_allongement=6
ALLONGEMENT DE LA VOILE 6
END
```

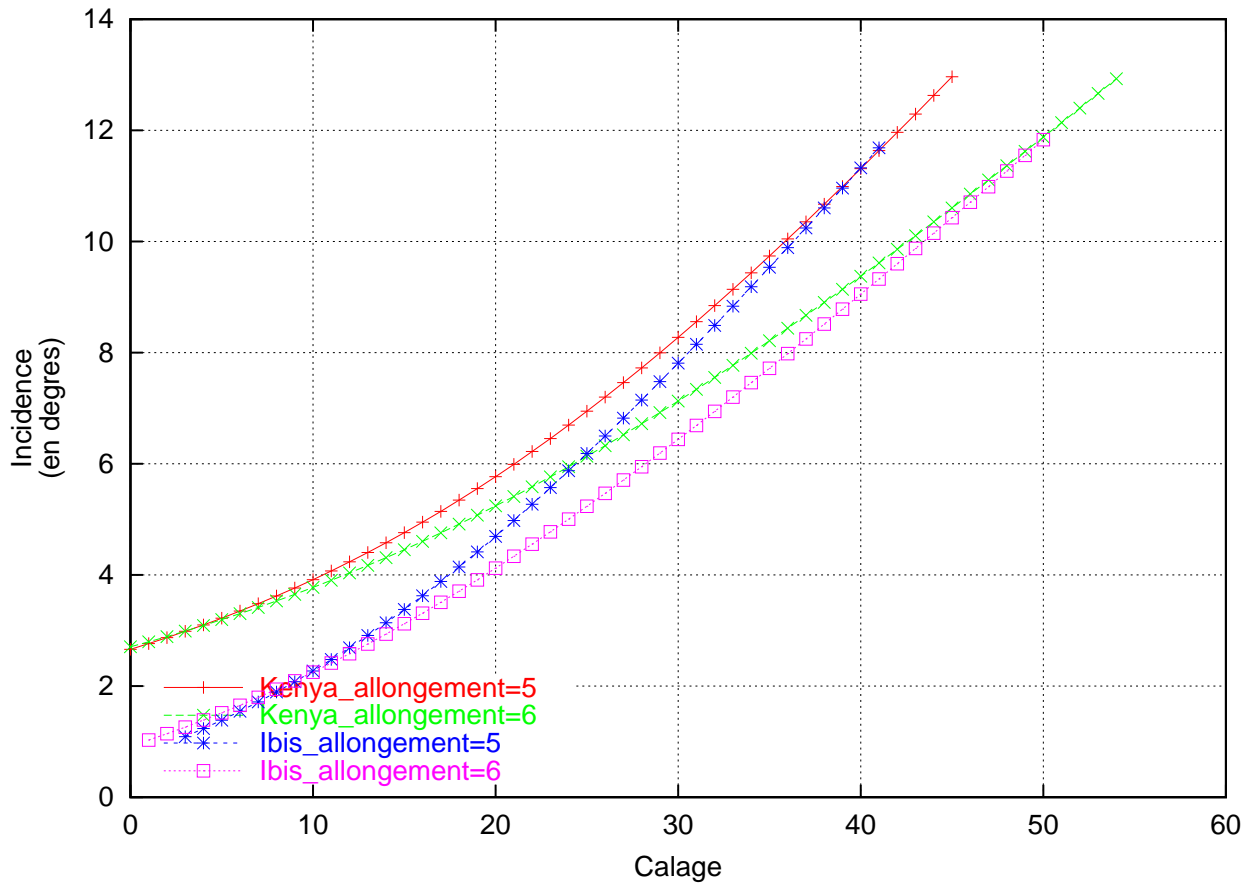


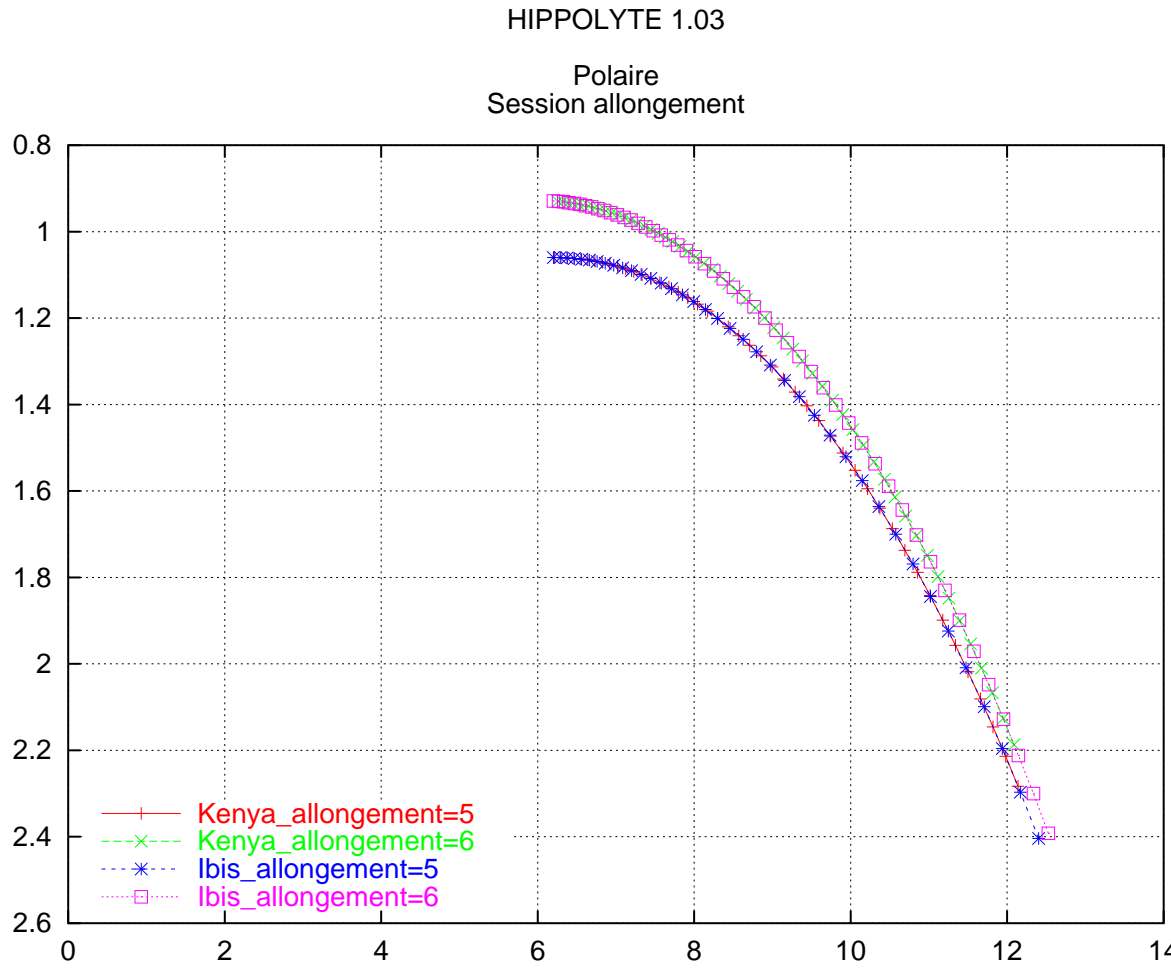


2.5 Influence de l'allongement

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session allongement

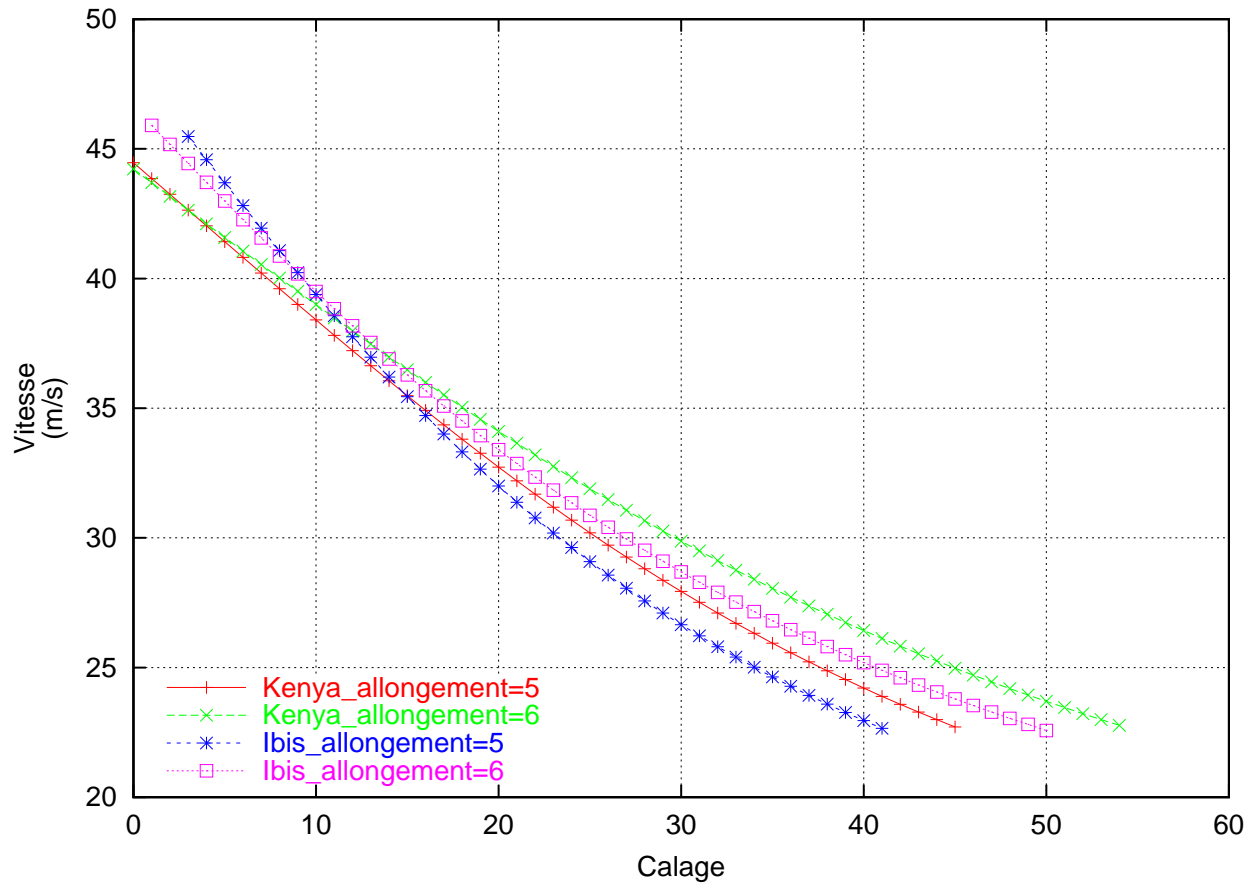


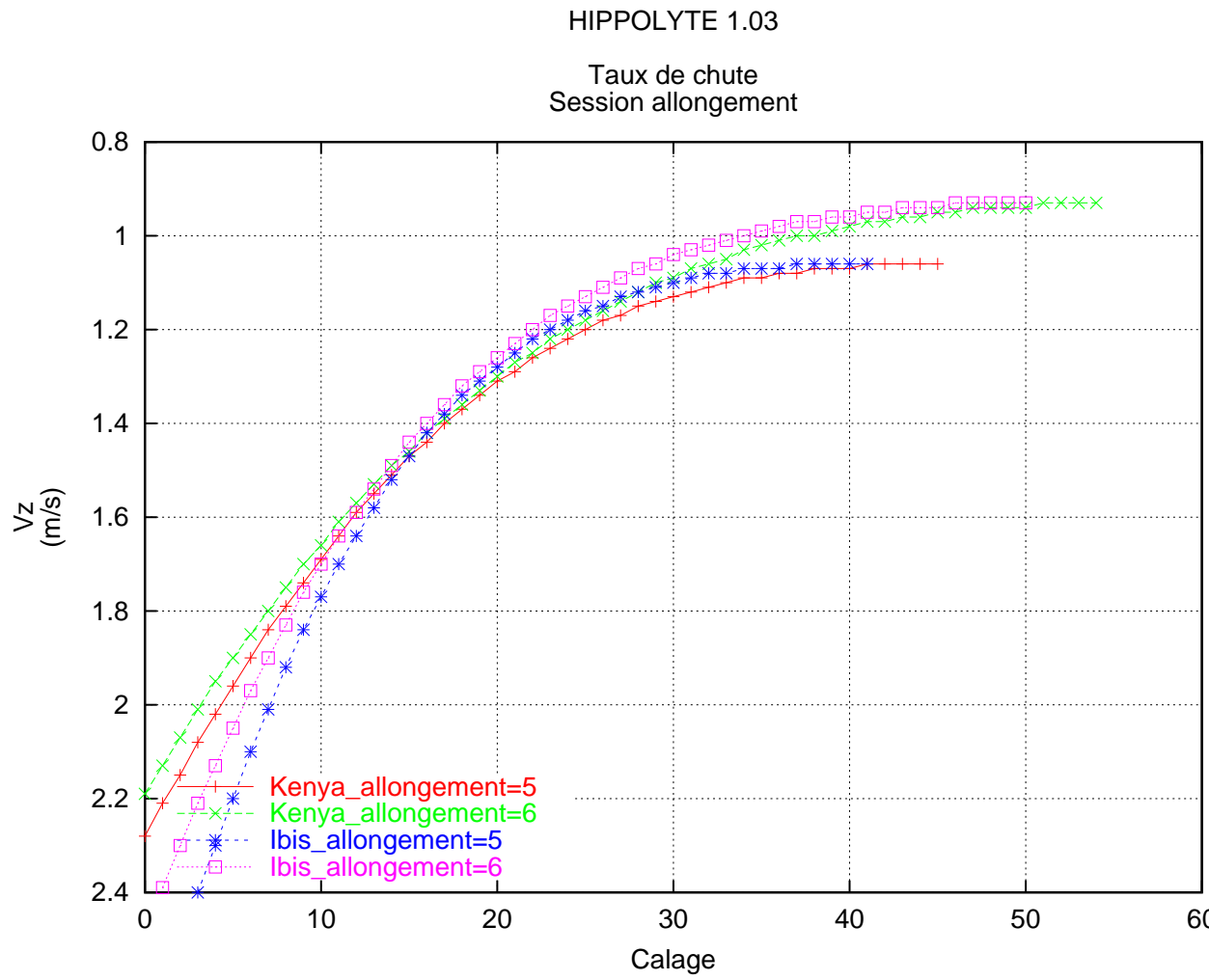


2.5 Influence de l'allongement

HIPPOLYTE 1.03

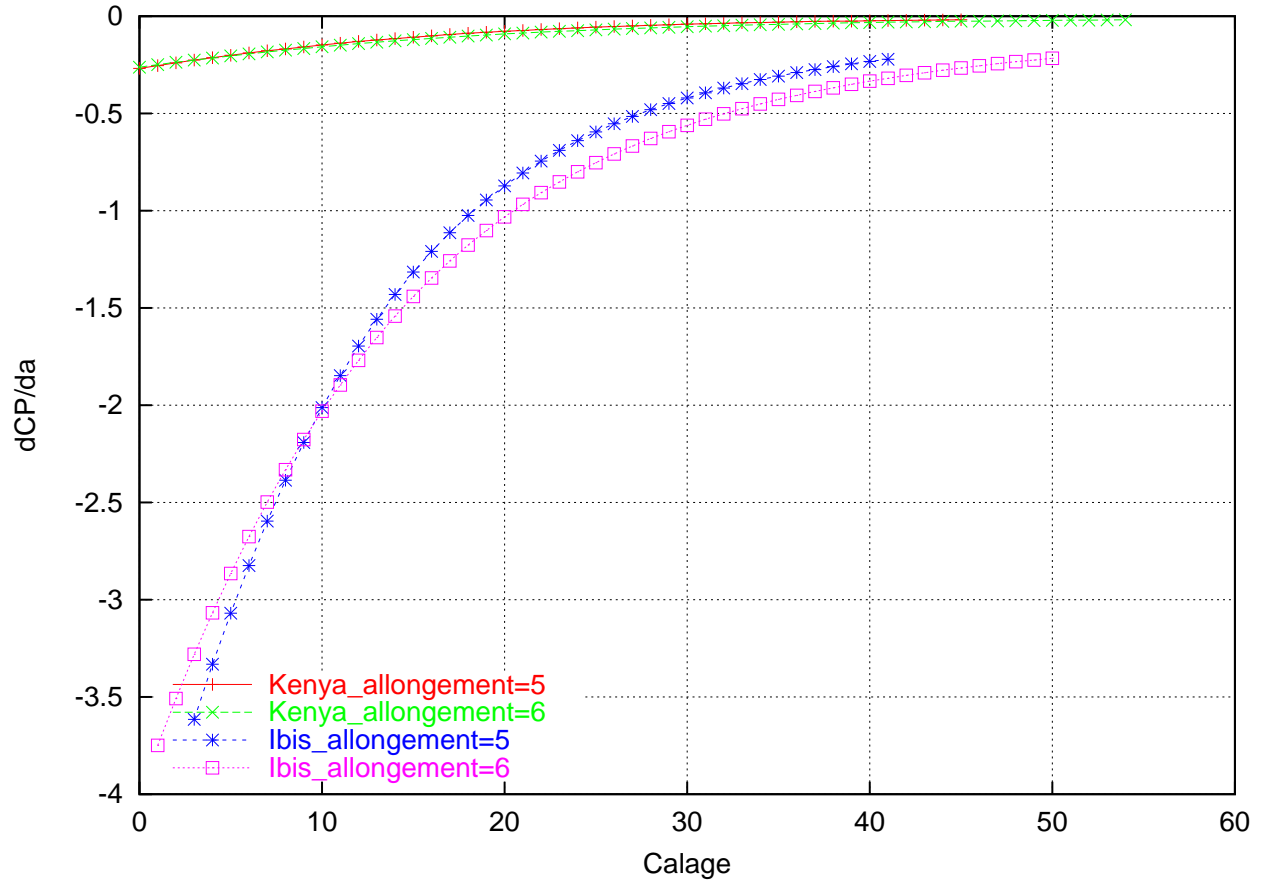
Vitesse
(m/s)
Session allongement





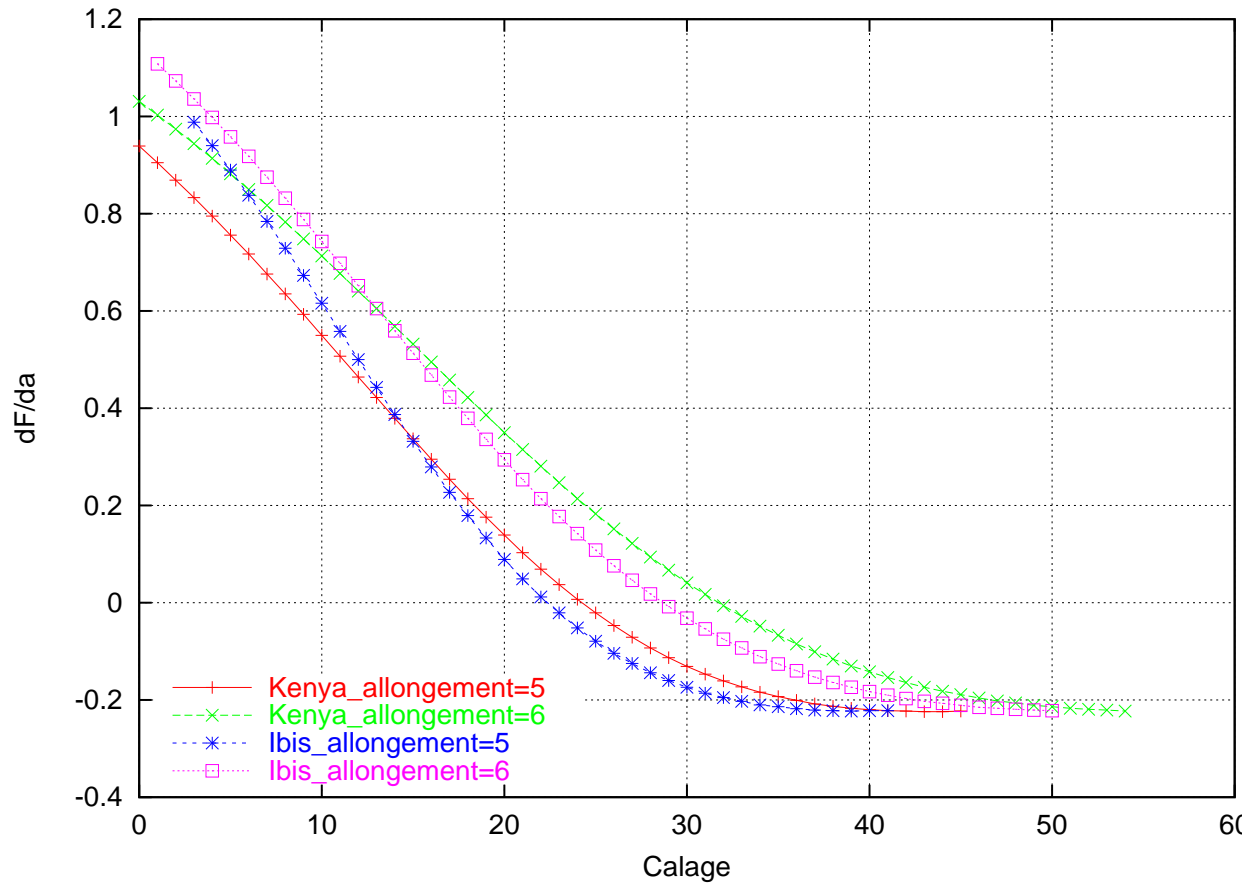
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session allongement



HIPPOLYTE 1.03

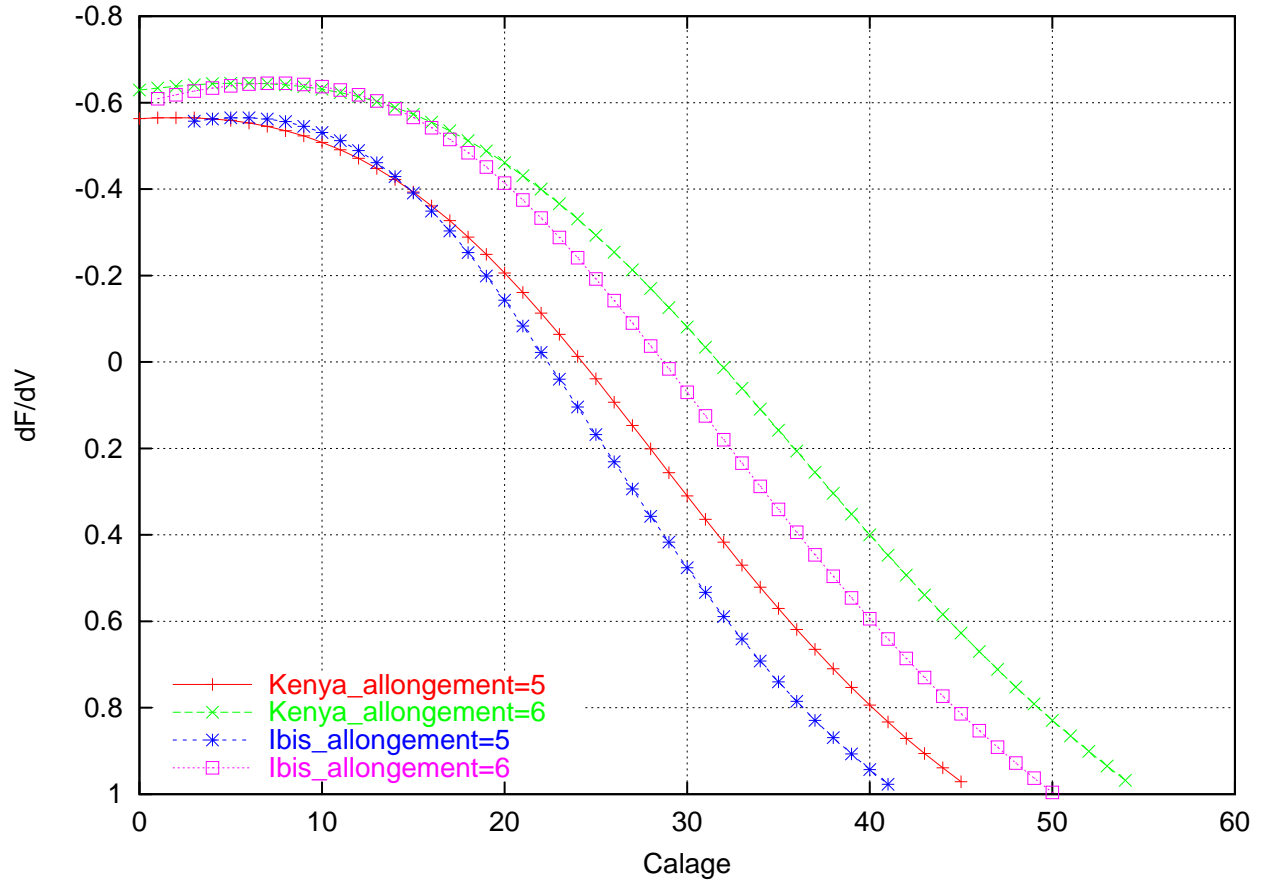
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session allongement



2.5 Influence de l'allongement

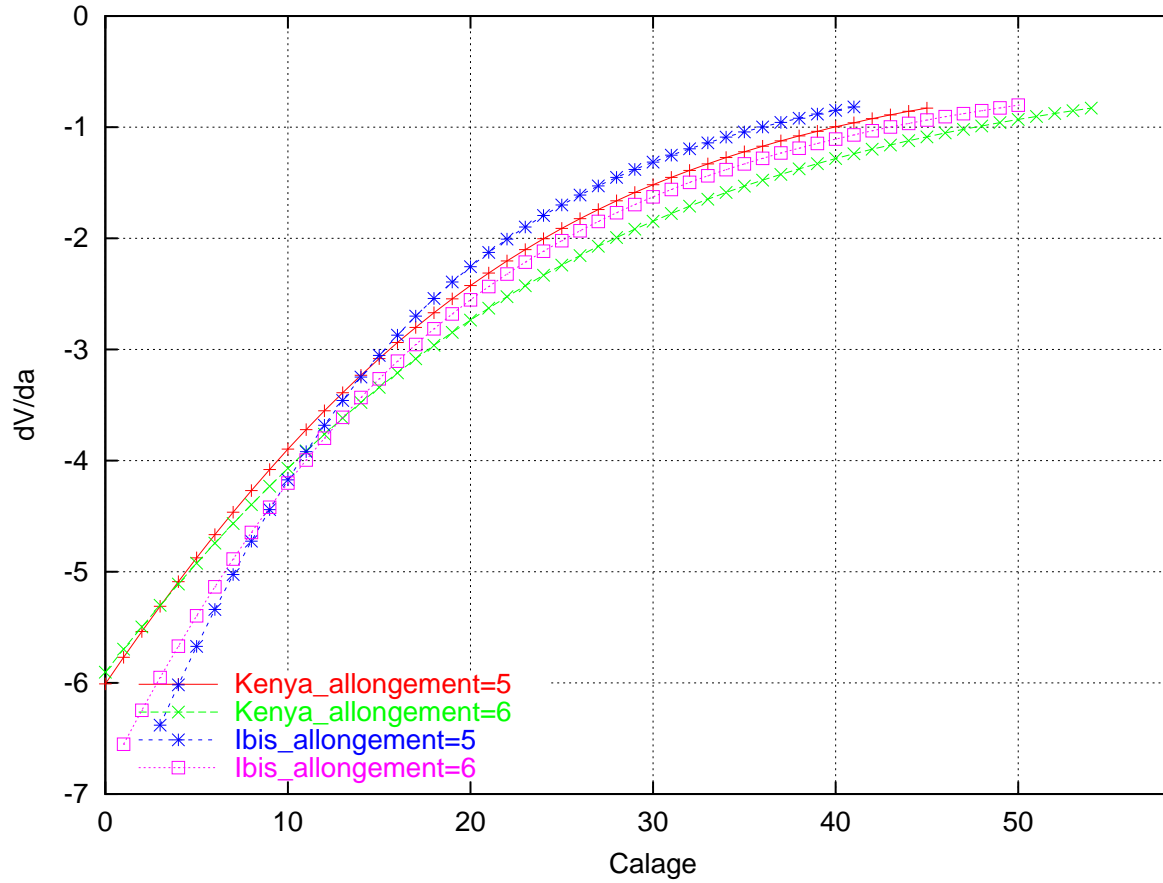
HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session allongement



HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session allongement



2.6 Influence de la masse du pilote

Le fichier de données est le suivant :

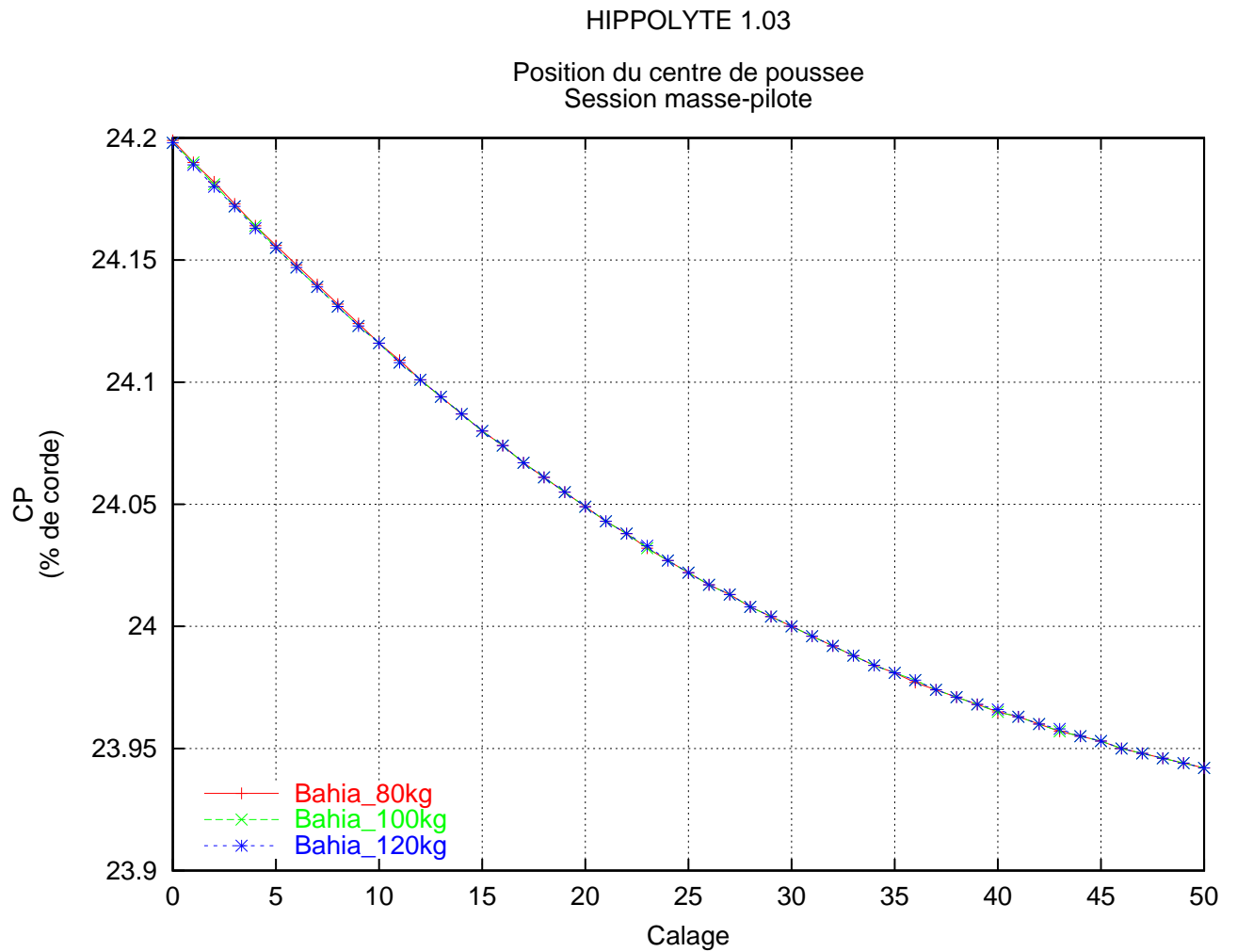
```

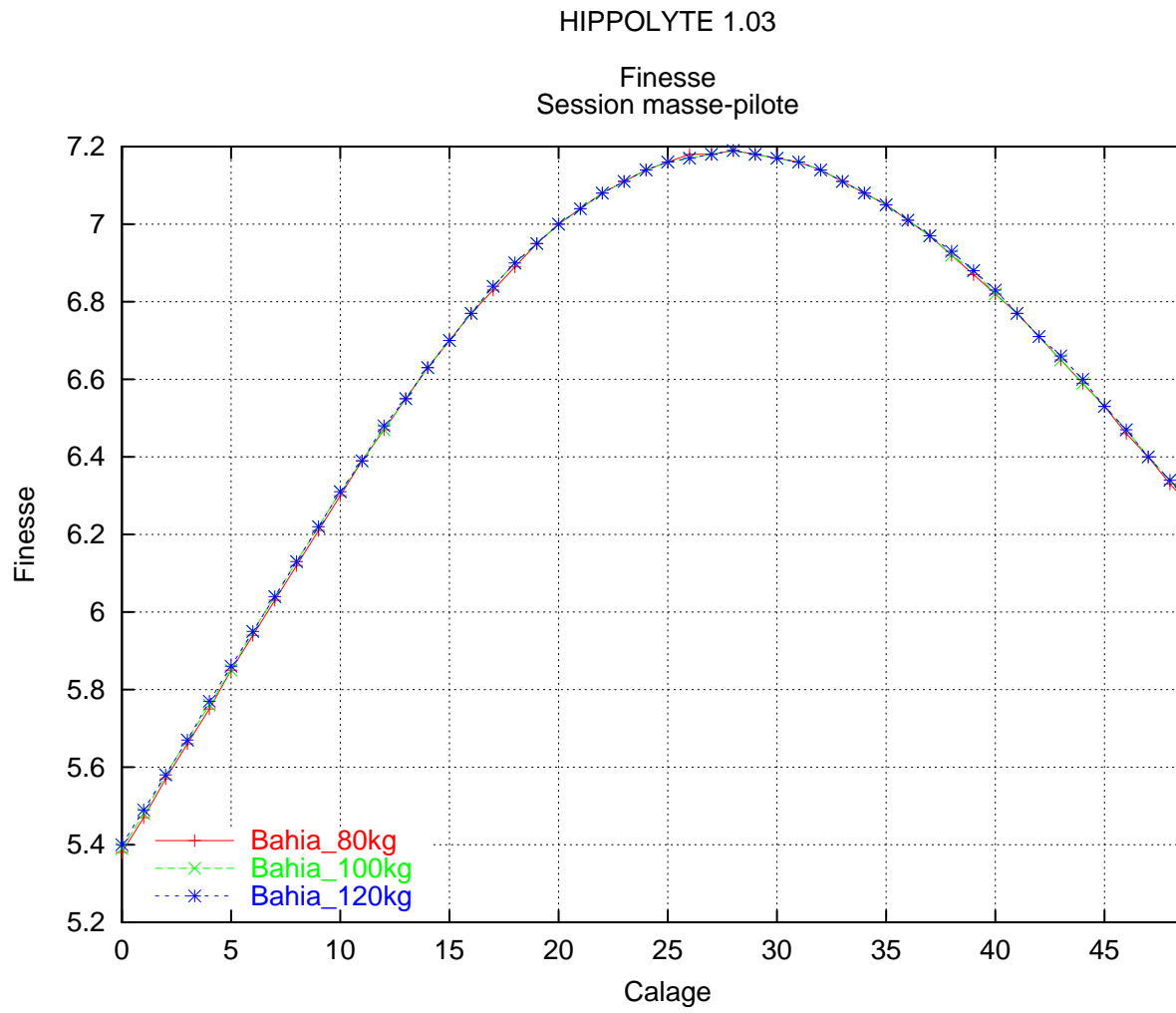
NOMBRE DE CONFIG           3

#je fais varier la masse du pilote de 80 à 120 kg
CONFIG1
  FICHER D'ENTREE             bahia.lis
  NOM DE LA VOILE             Bahia_80kg
  MASSE DU PILOTE             80
CONFIG2
  FICHER D'ENTREE             bahia.lis
  NOM DE LA VOILE             Bahia_100kg
    
```

2.6 Influence de la masse du pilote

```
MASSE DU PILOTE      100
CONFIG3
FICHER D'ENTREE      bahia.lis
NOM DE LA VOILE      Bahia_120kg
MASSE DU PILOTE      120
END
```

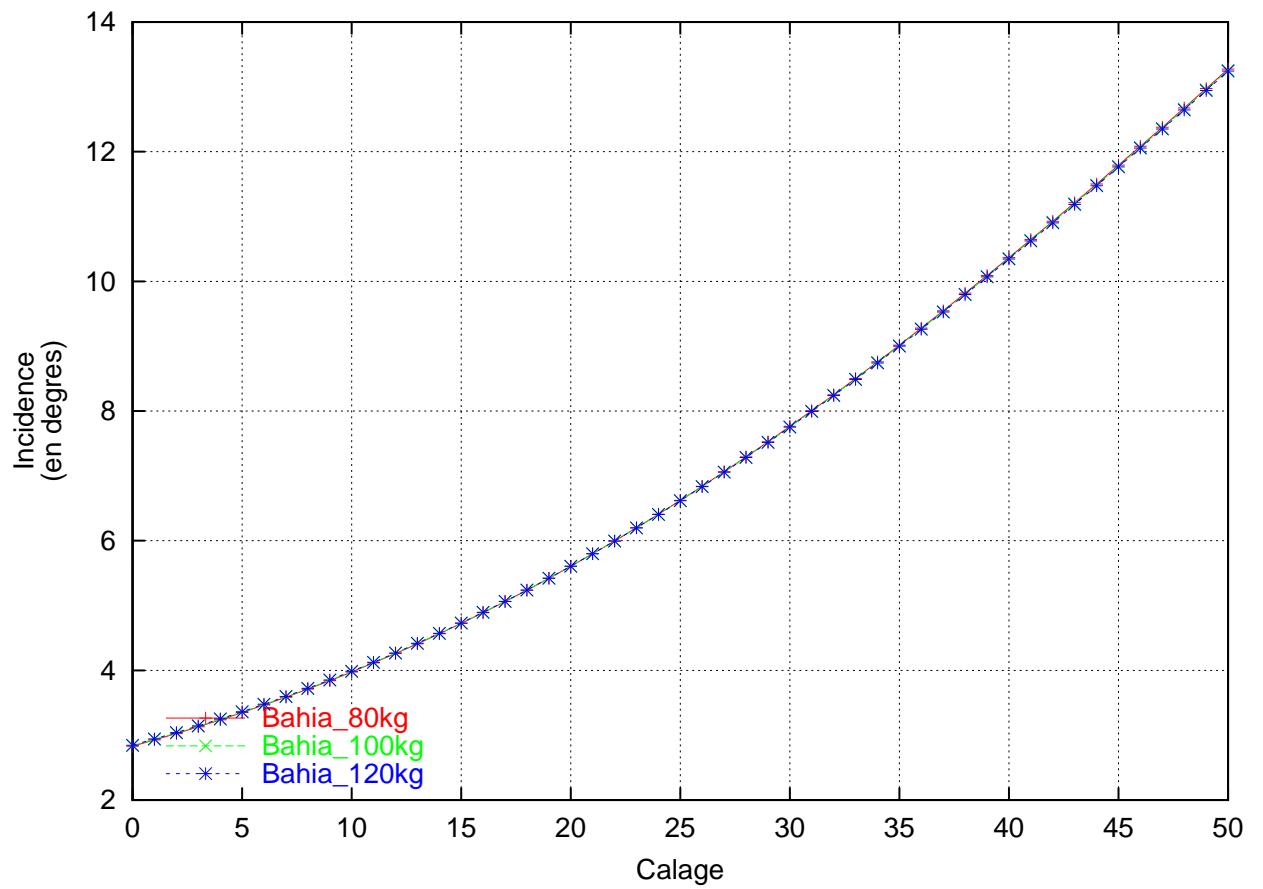


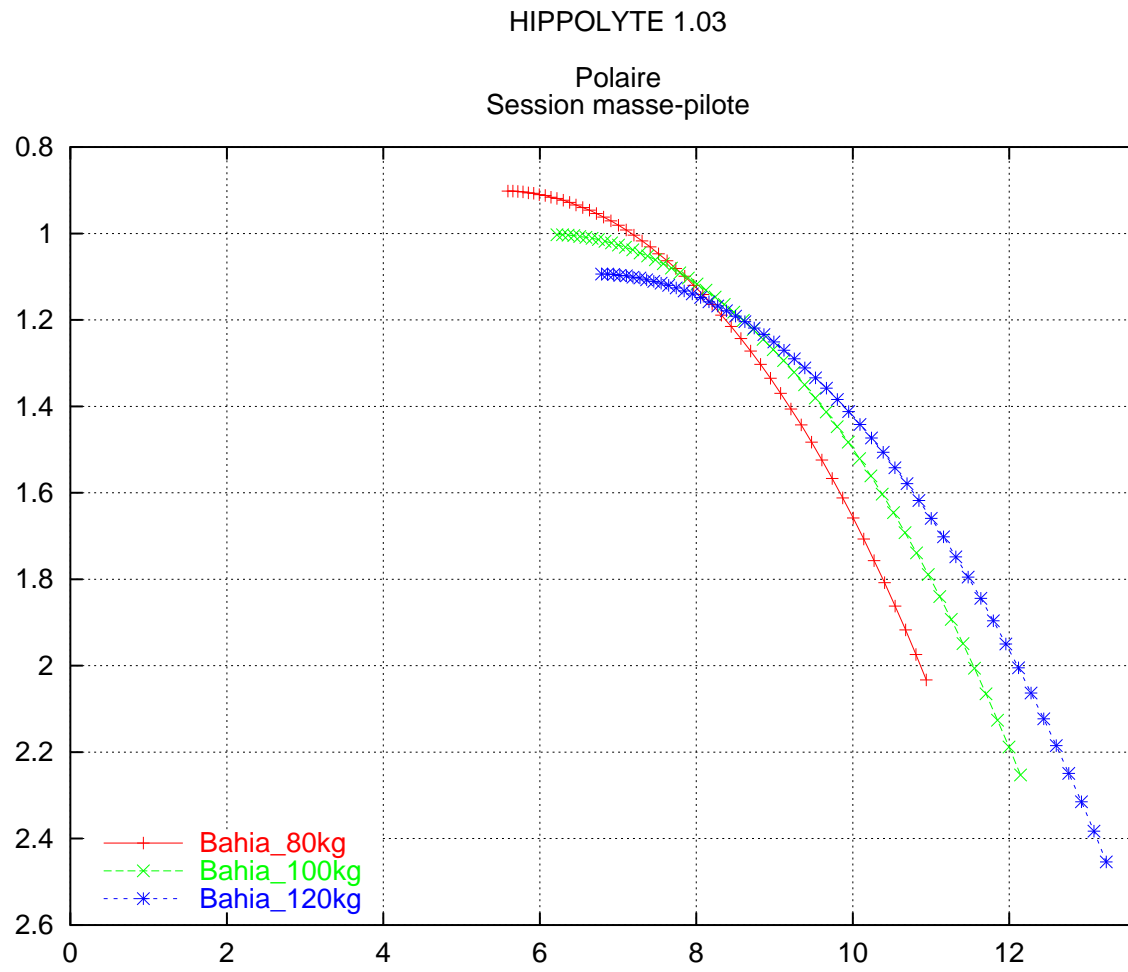


2.6 Influence de la masse du pilote

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session masse-pilote

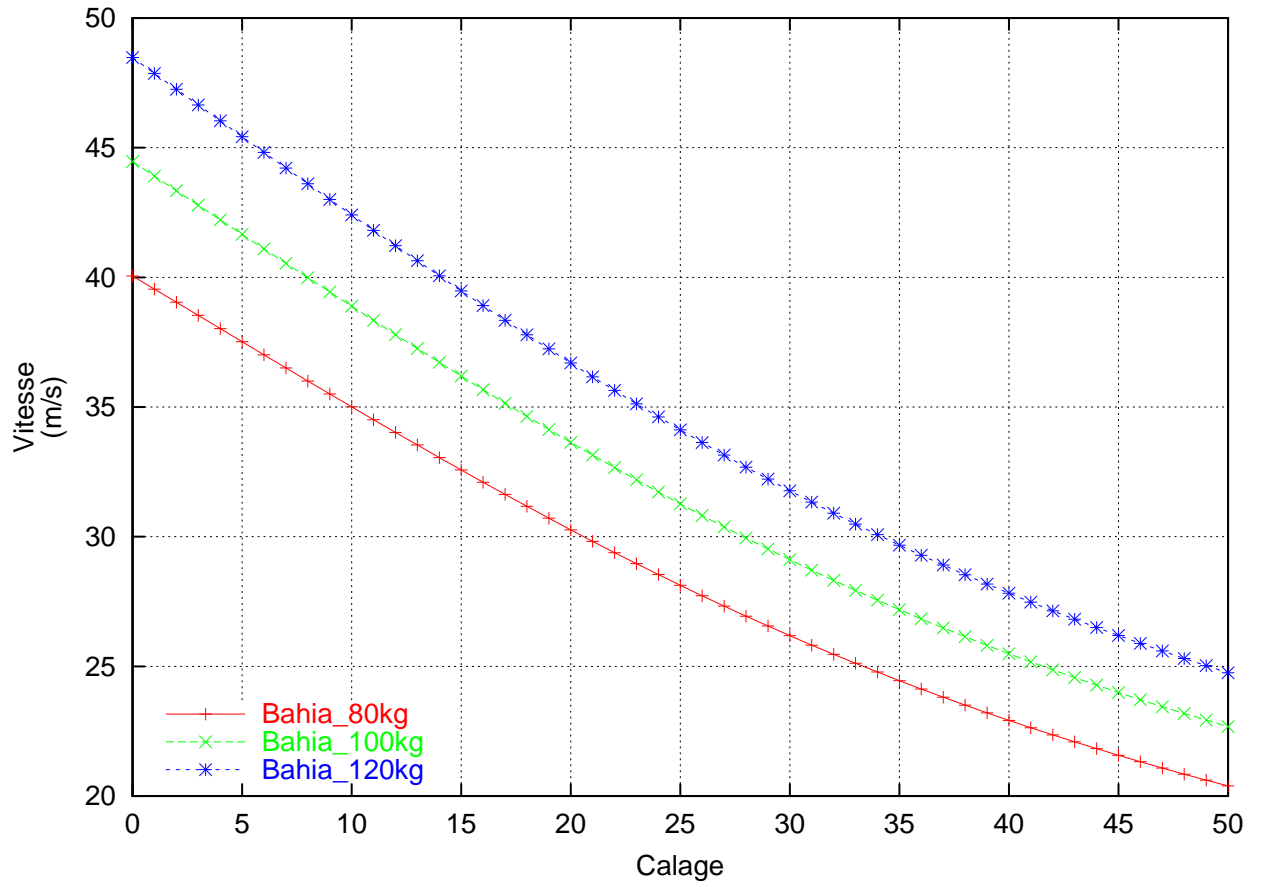


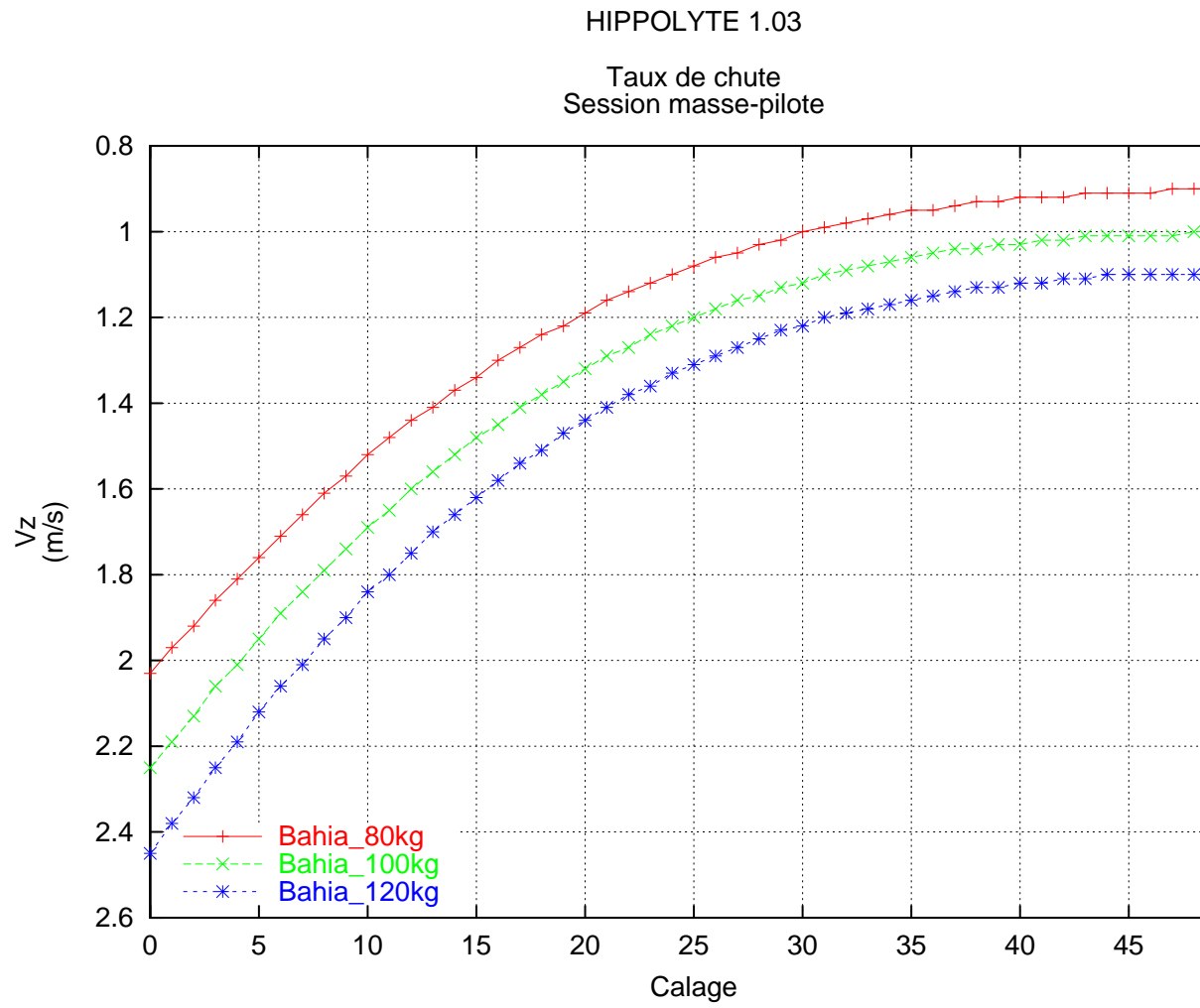


2.6 Influence de la masse du pilote

HIPPOLYTE 1.03

Vitesse
(m/s)
Session masse-pilote

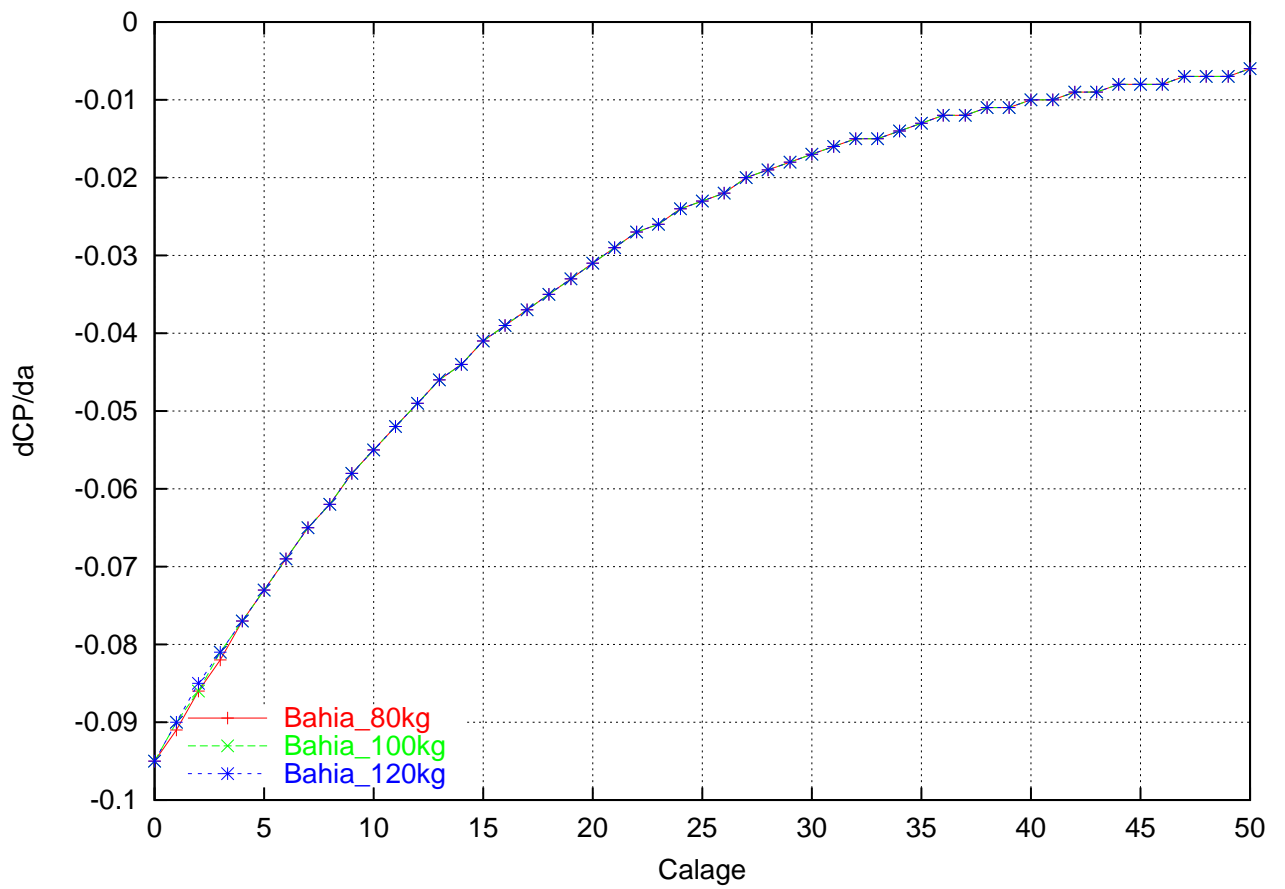




2.6 Influence de la masse du pilote

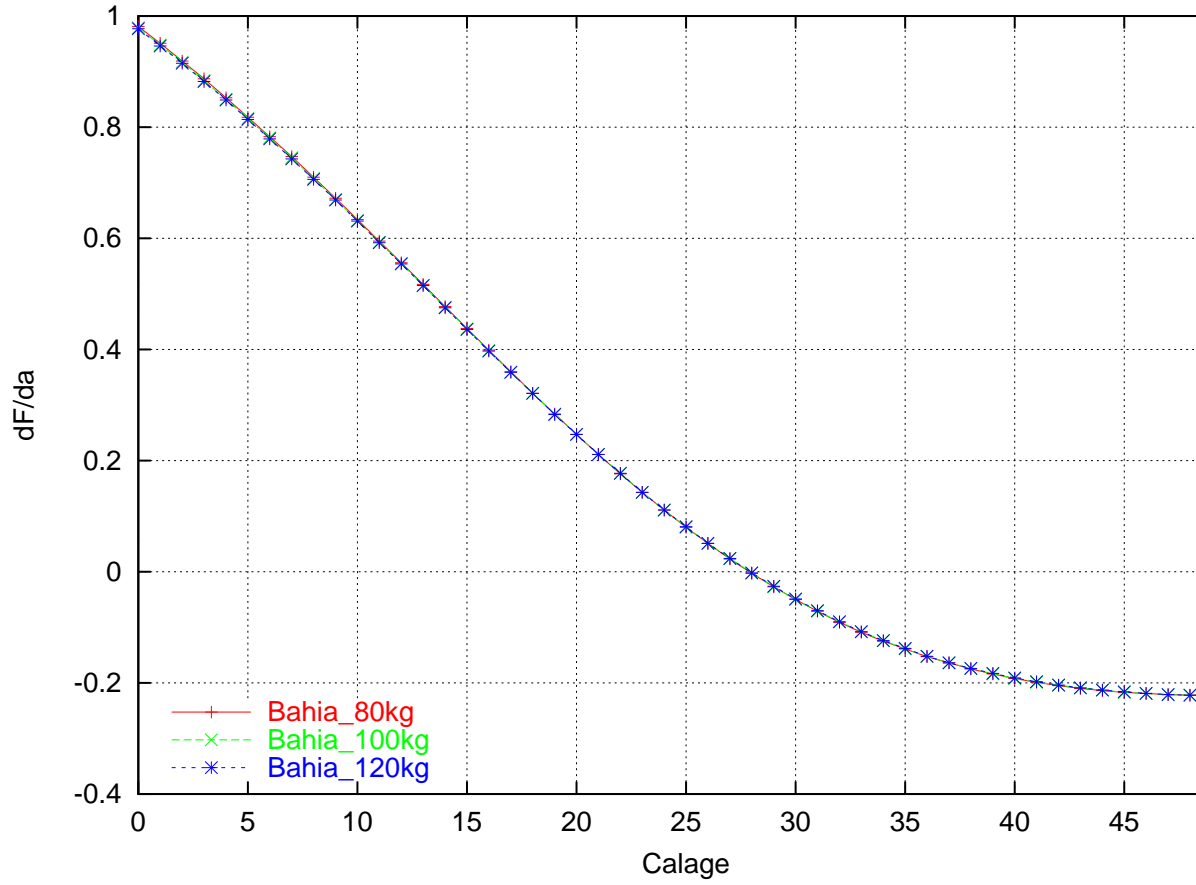
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session masse-pilote



HIPPOLYTE 1.03

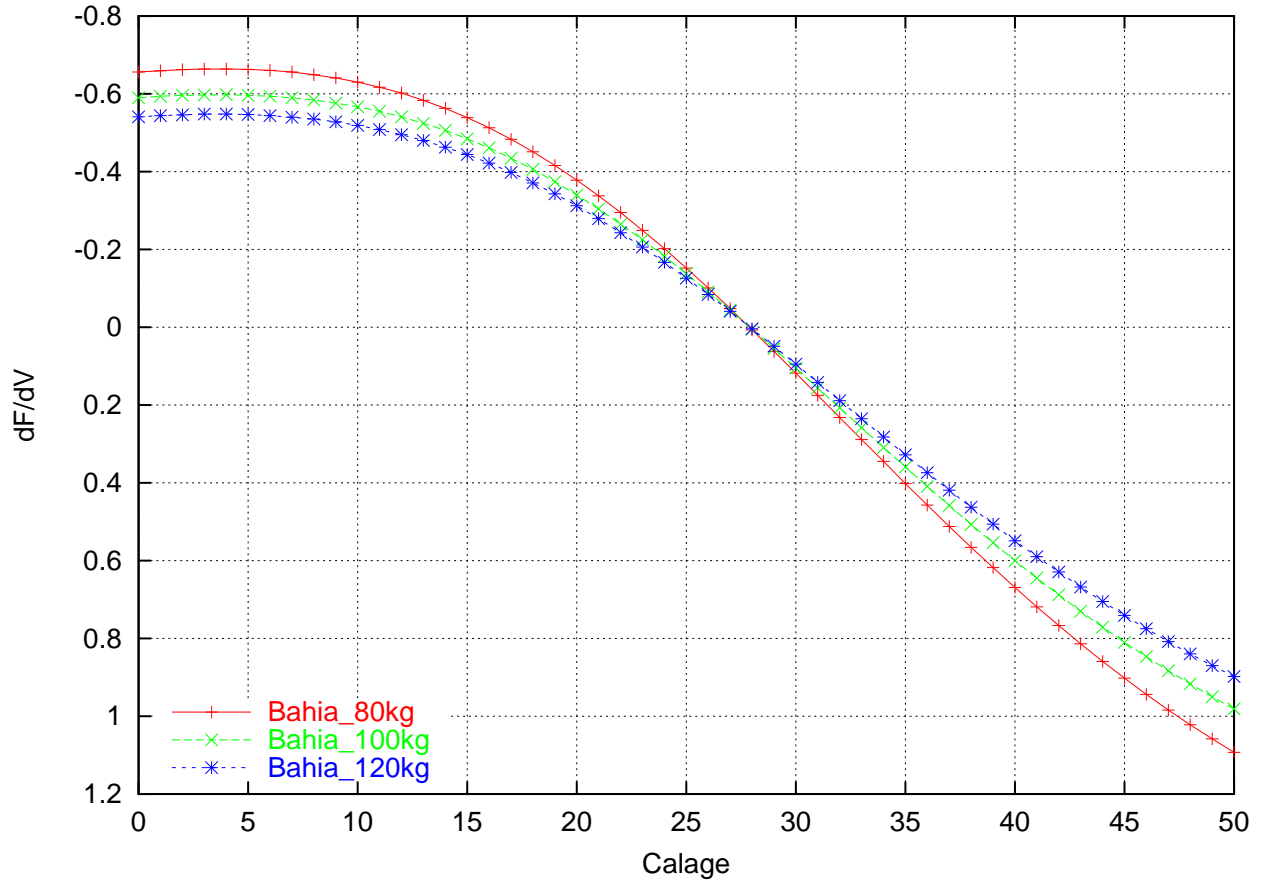
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session masse-pilote

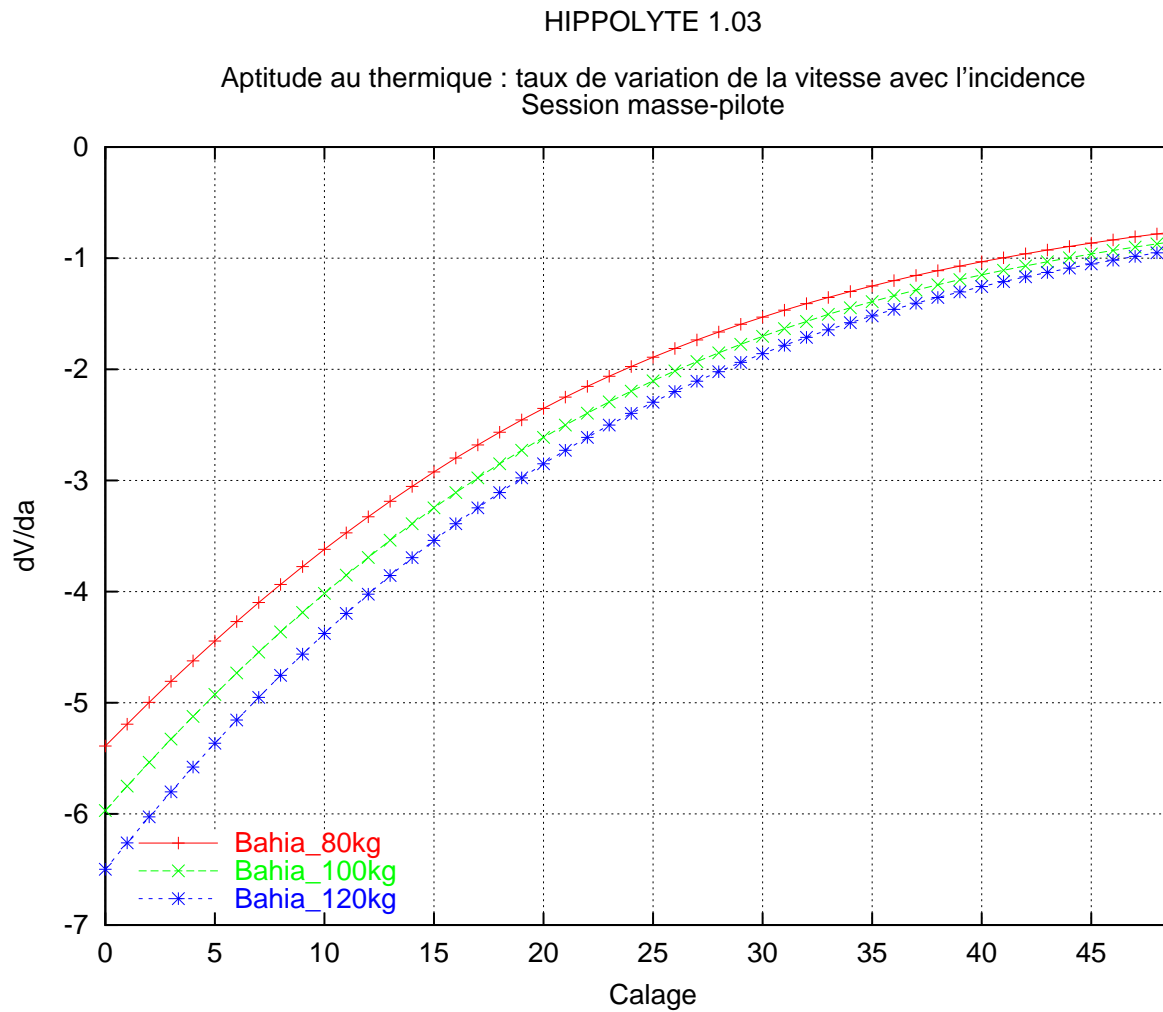


2.6 Influence de la masse du pilote

HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session masse-pilote





2.7 Influence de la charge alaire

ultérieurement

2.8 Influence de la masse de la voile

Le fichier de données est le suivant :

NOMBRE DE CONFIG 3

#je fais varier la masse de la voile de 3 a 7 kg

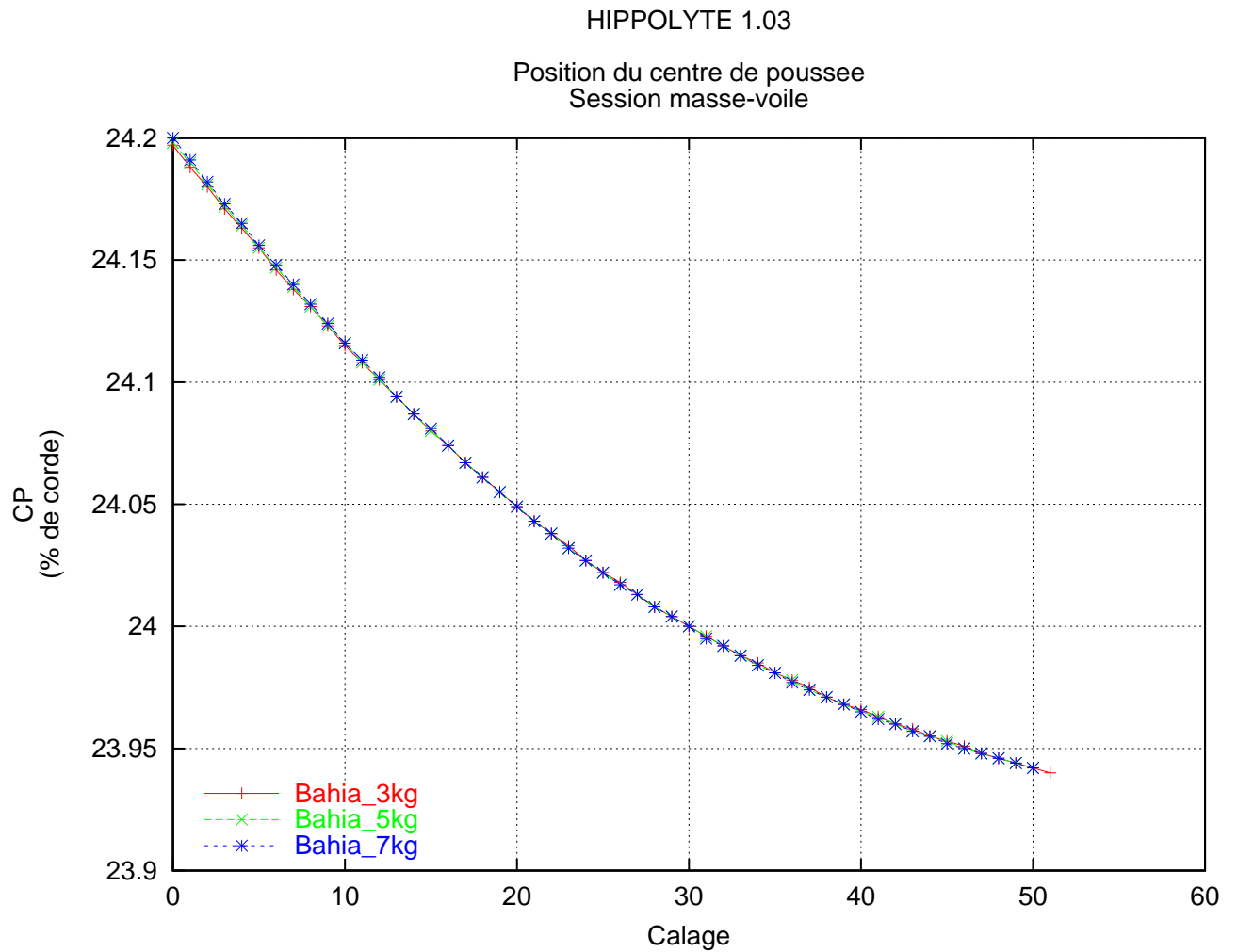
CONFIG1

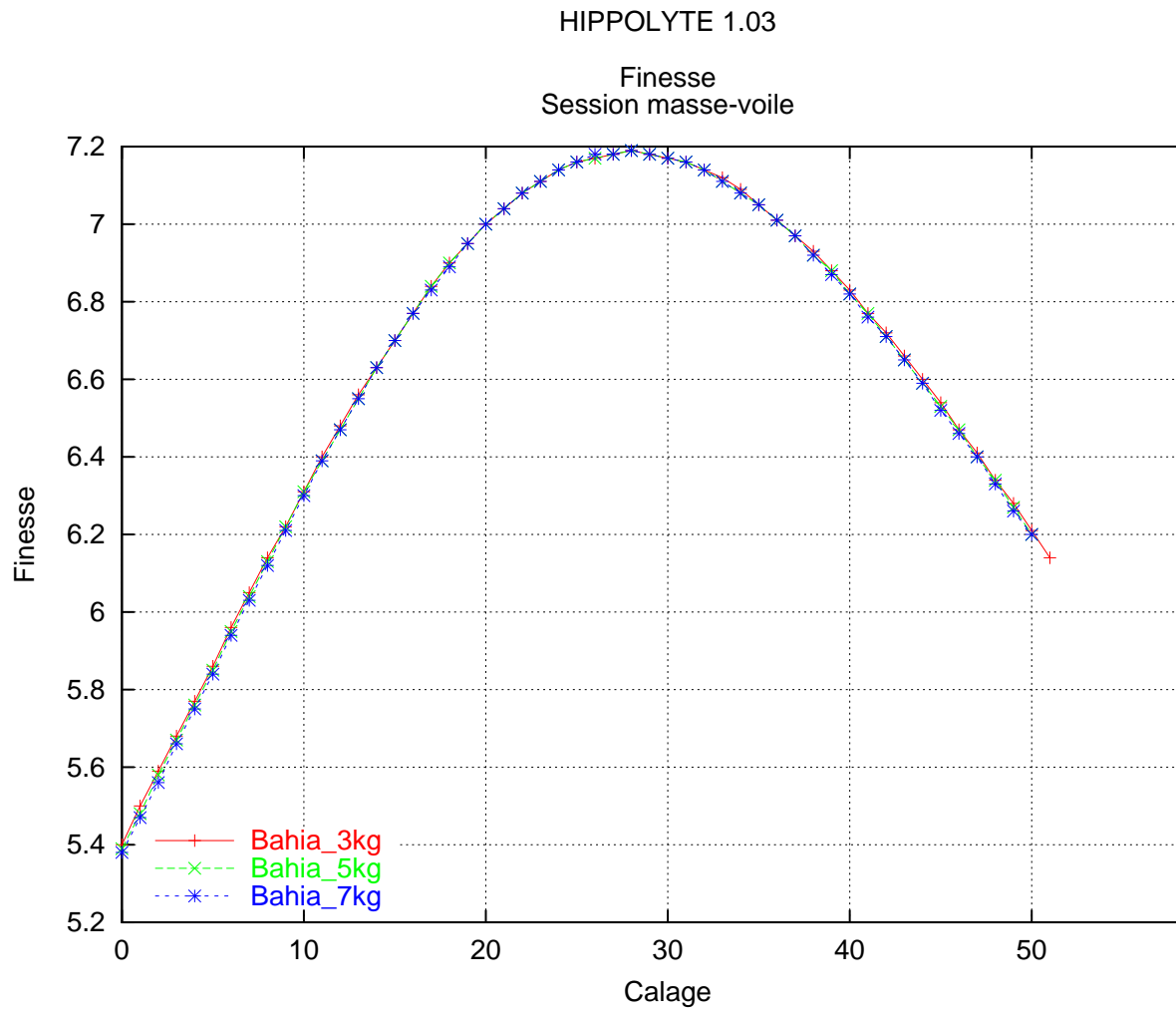
FICHER D'ENTREE bahia.lis

NOM DE LA VOILE Bahia_3kg

2.8 Influence de la masse de la voile

```
MASSE DE LA VOILE      3.0
CONFIG2
  FICHER D'ENTREE      bahia.lis
  NOM DE LA VOILE      Bahia_5kg
  MASSE DE LA VOILE    5.0
CONFIG3
  FICHER D'ENTREE      bahia.lis
  NOM DE LA VOILE      Bahia_7kg
  MASSE DE LA VOILE    7.0
END
```

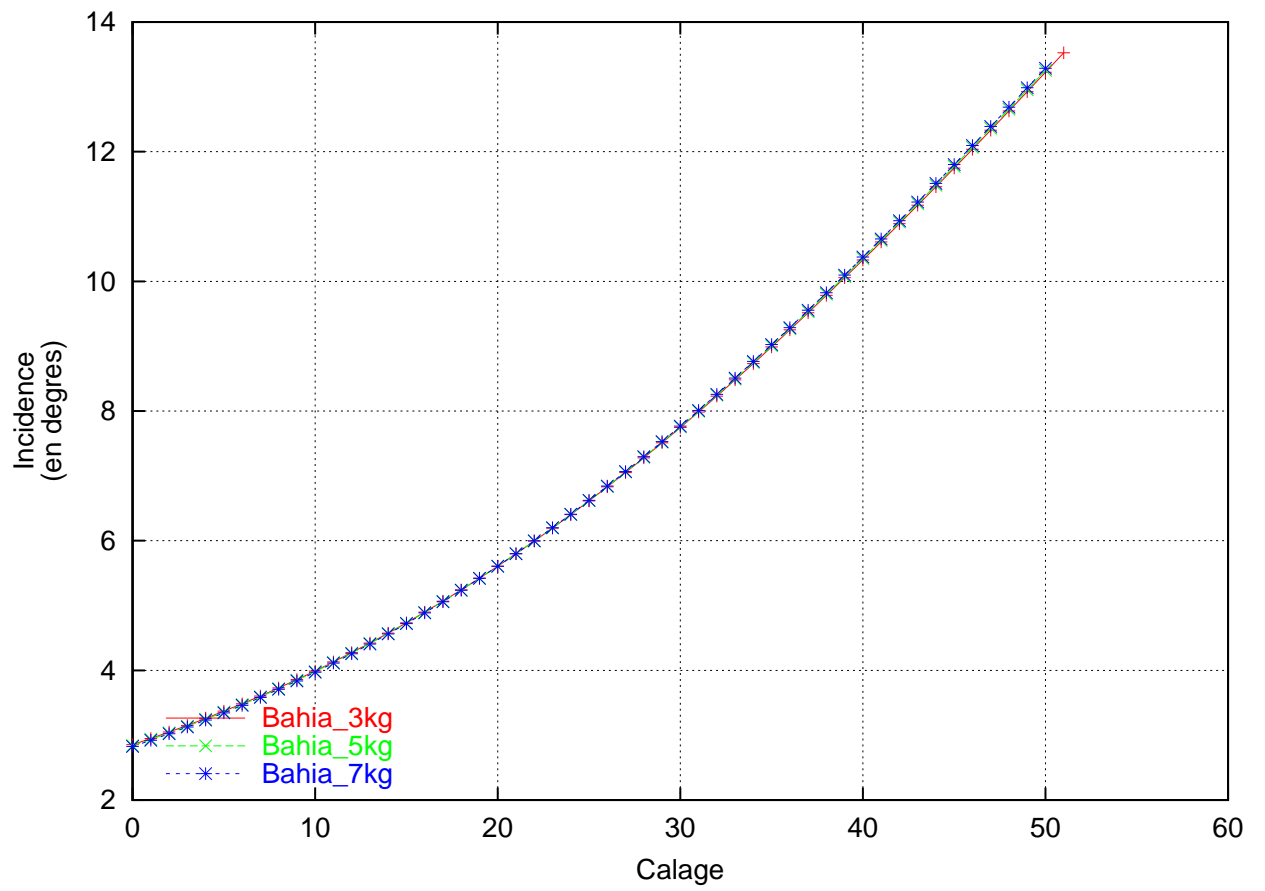


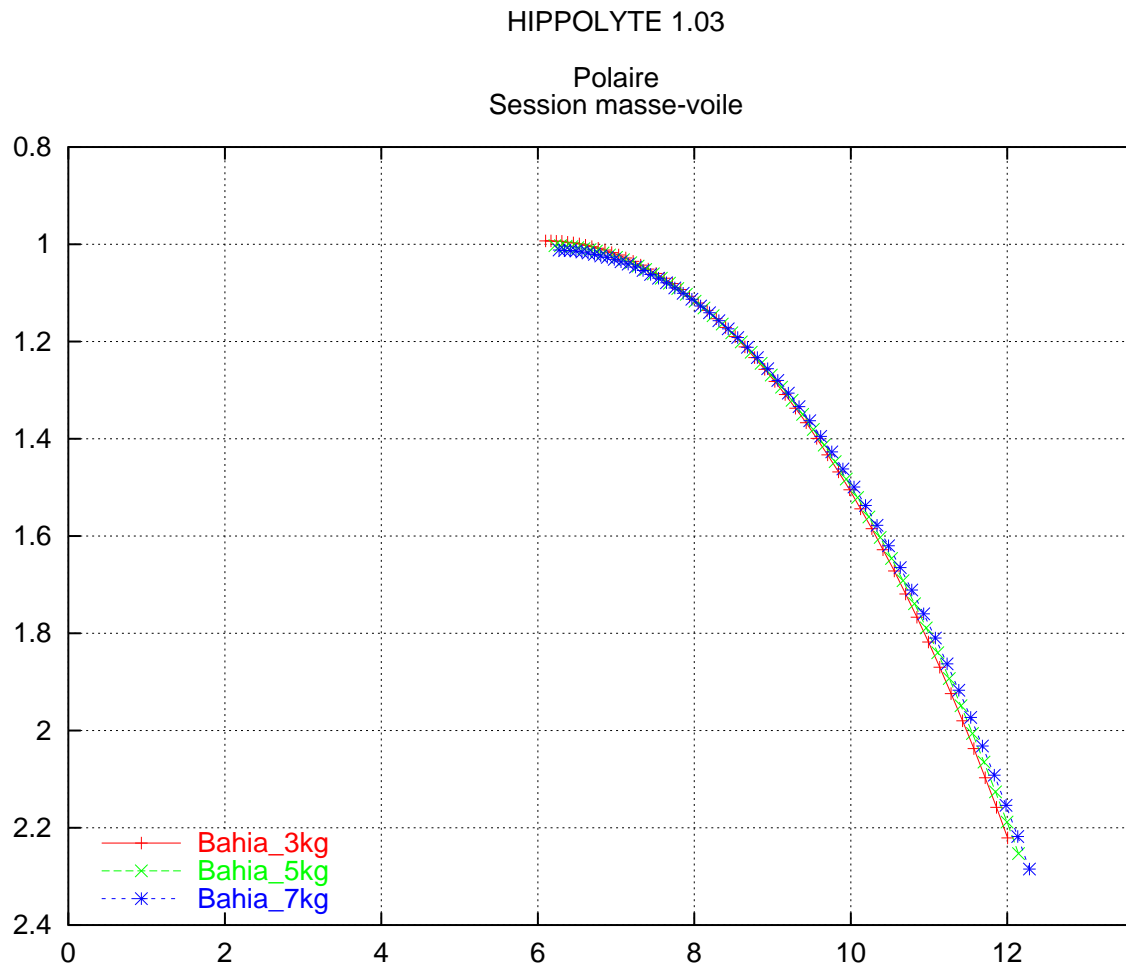


2.8 Influence de la masse de la voile

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session masse-voile

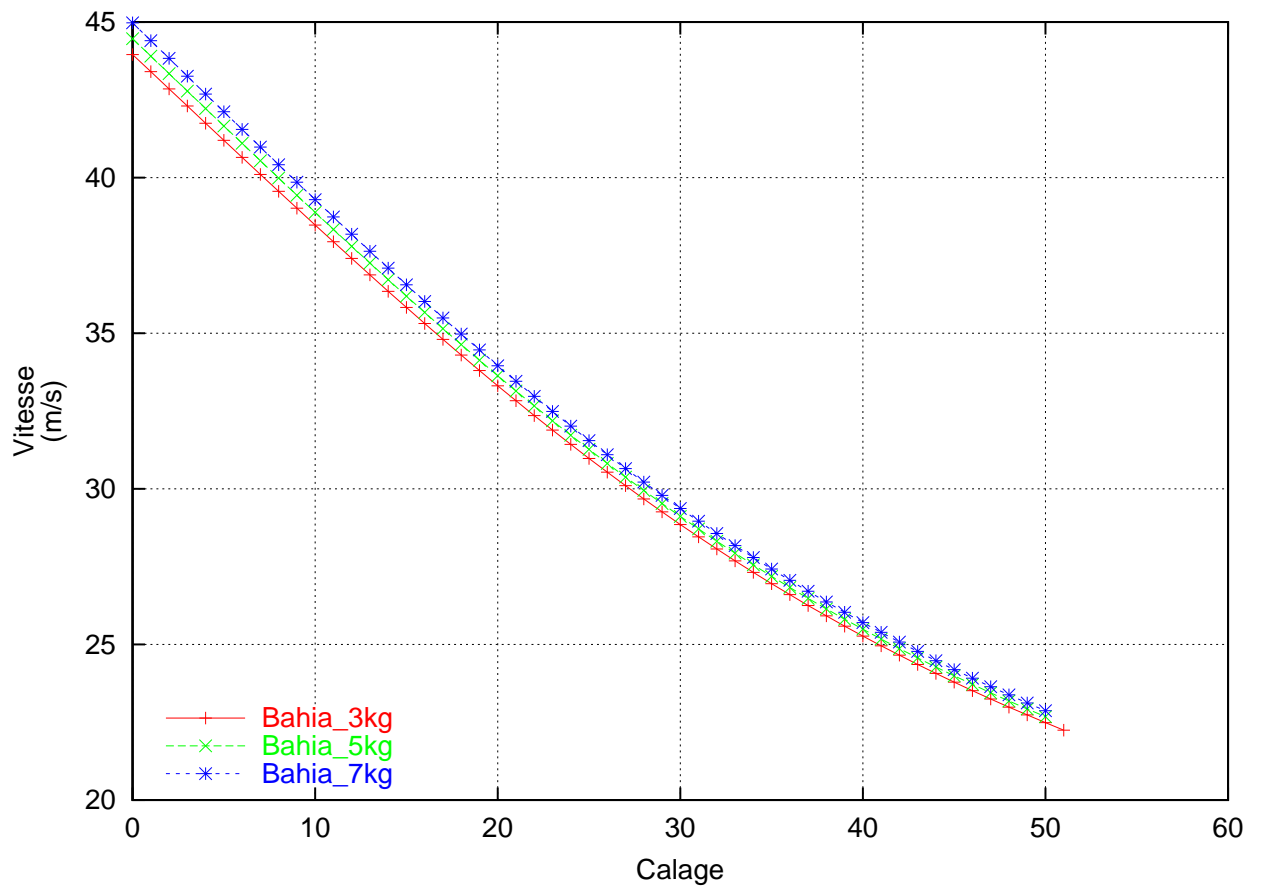


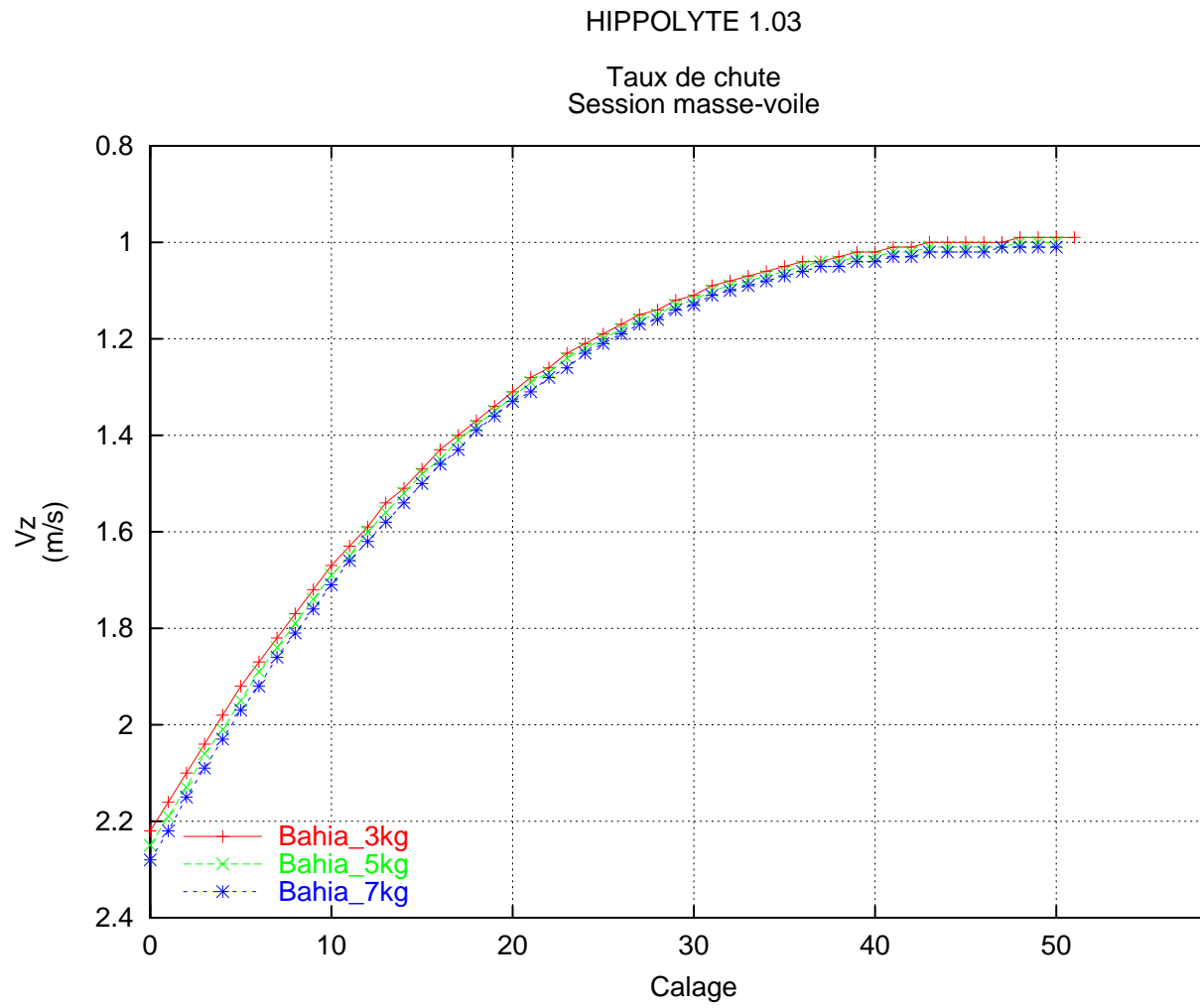


2.8 Influence de la masse de la voile

HIPPOLYTE 1.03

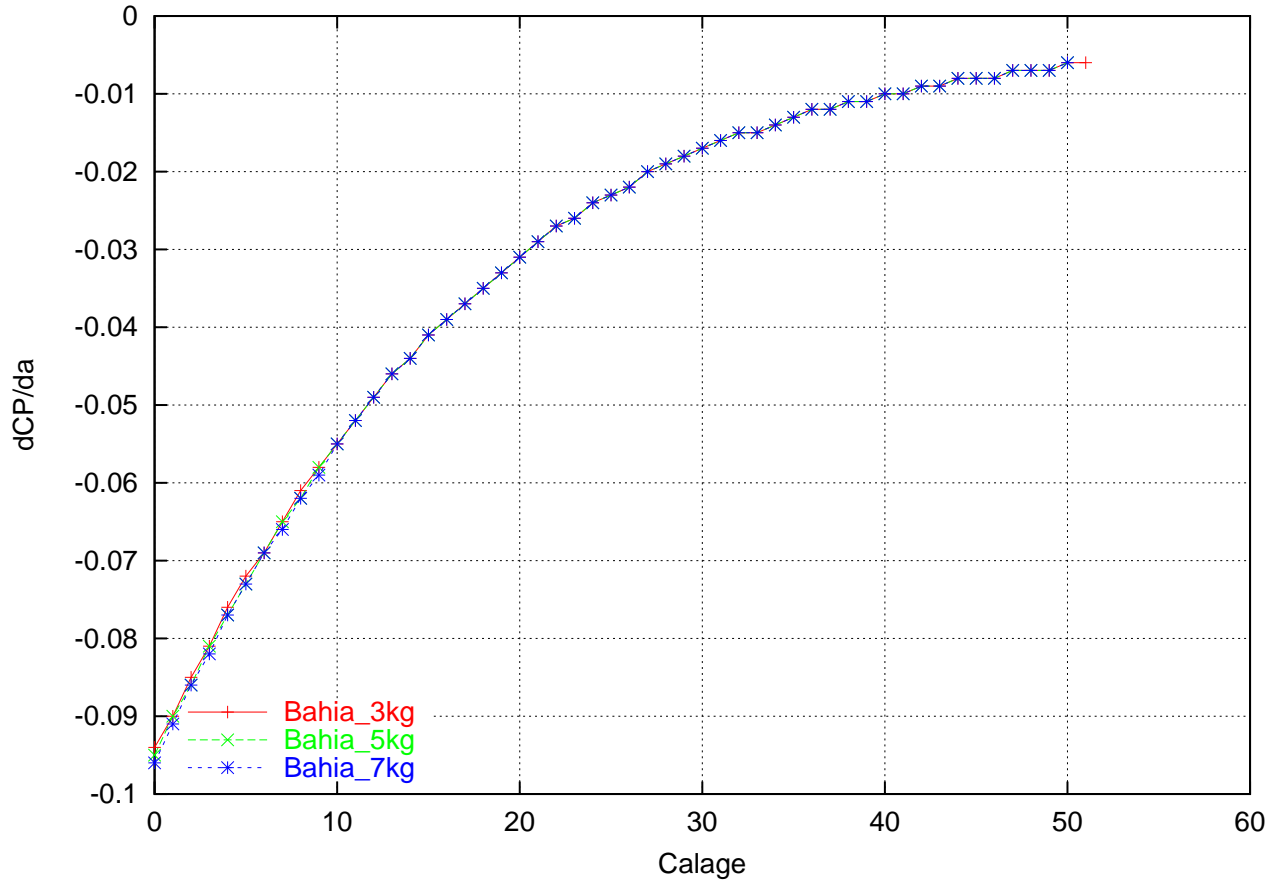
Vitesse
(m/s)
Session masse-voile

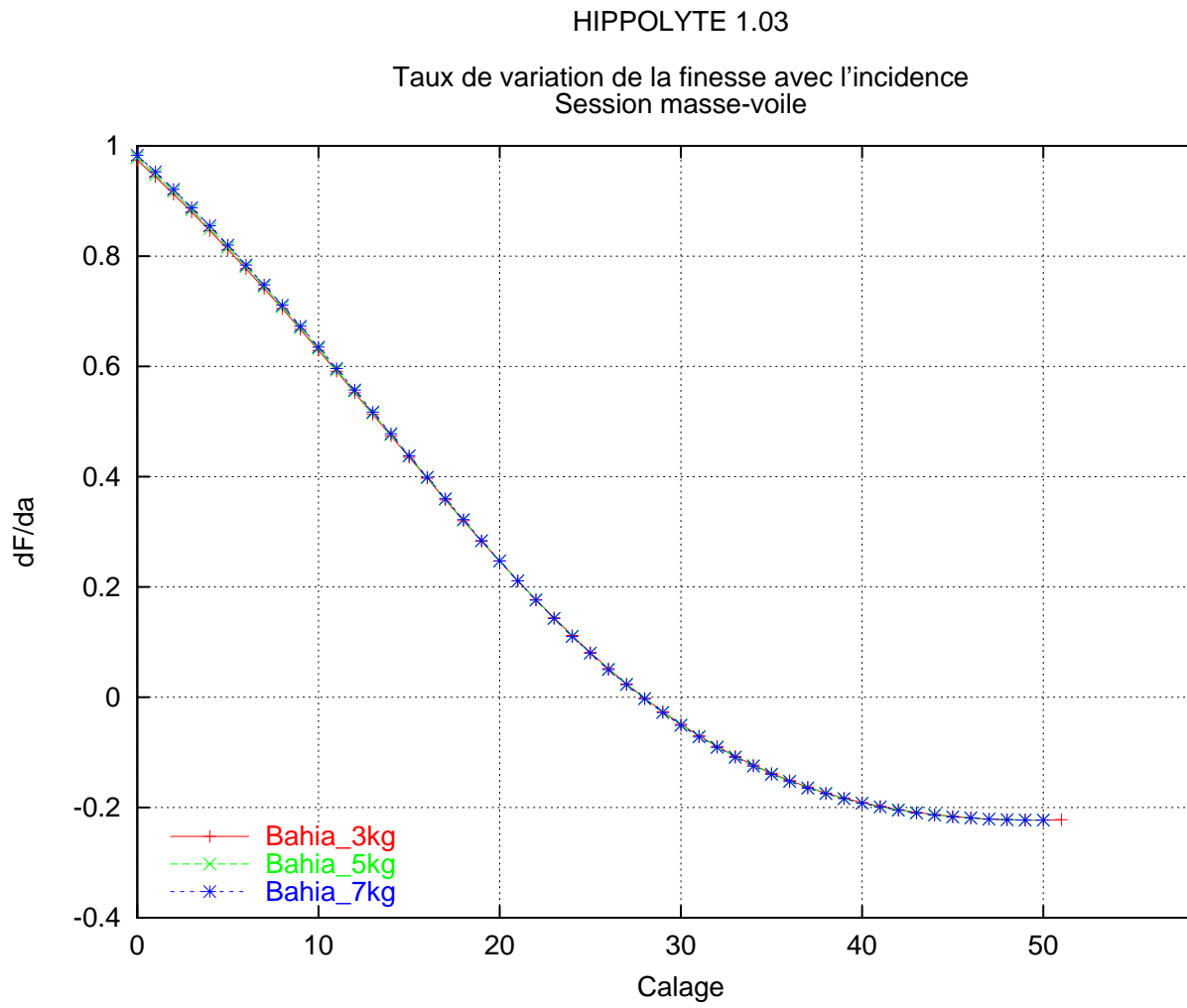




HIPPOLYTE 1.03

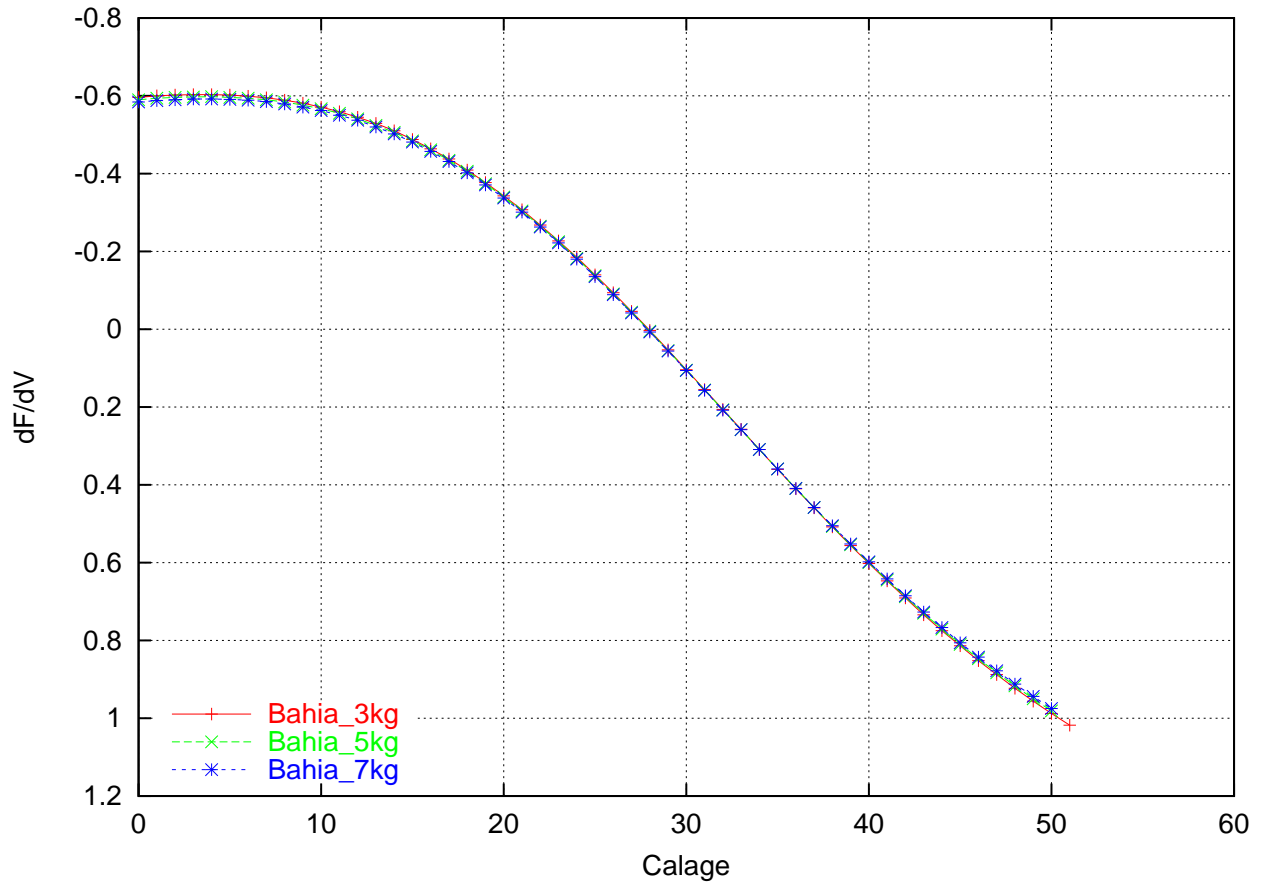
Stabilité tangage : taux de variation du centre de pousse avec l'incidence
Session masse-voile





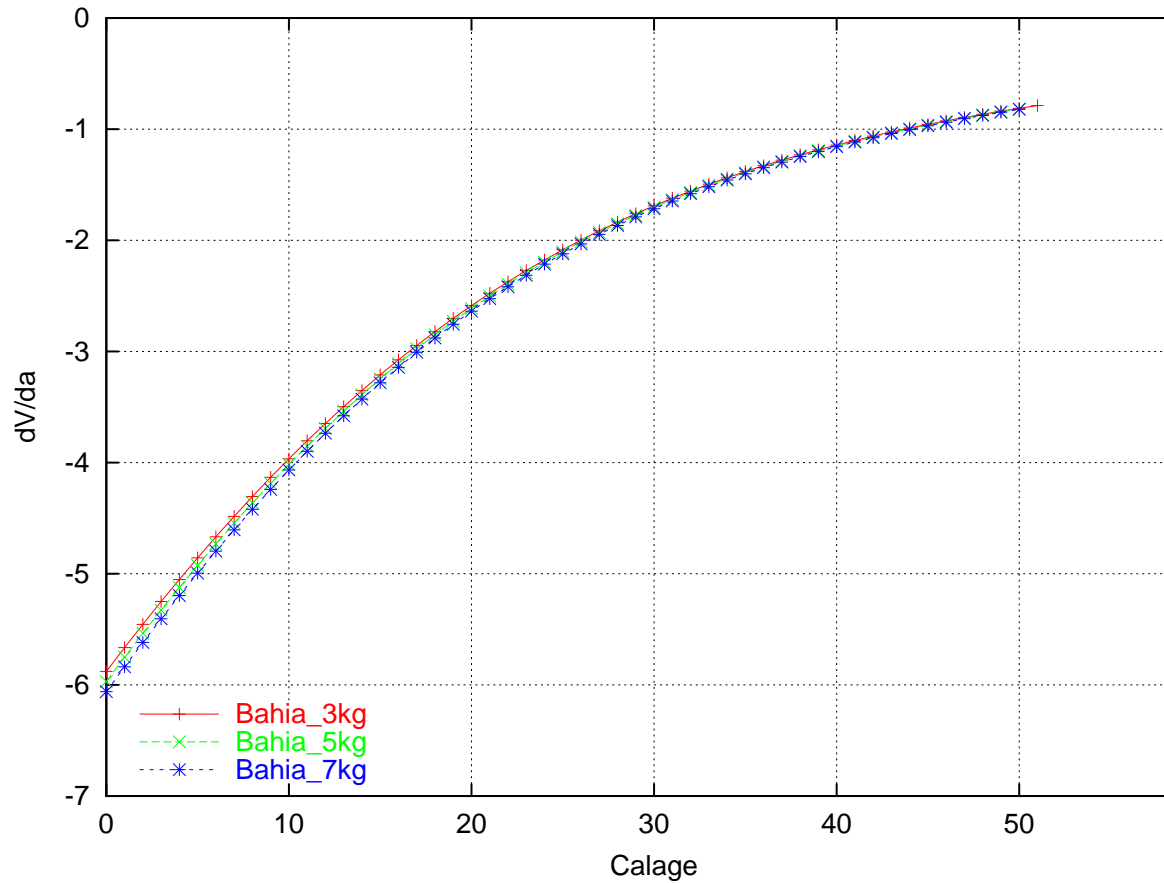
HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session masse-voile



HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session masse-voile



2.9 Influence du SCx pilote

Le fichier de données est le suivant :

```

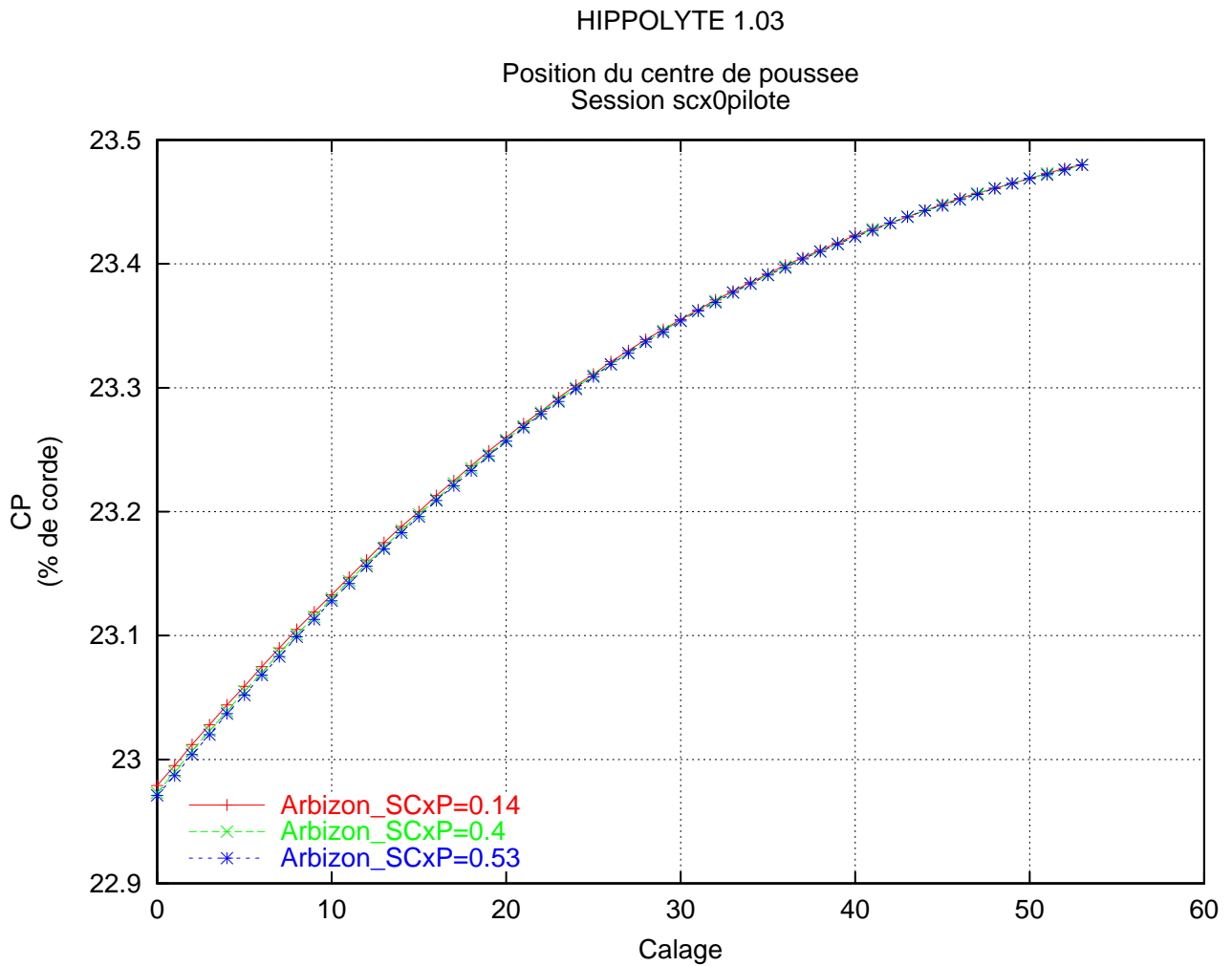
NOMBRE DE CONFIG          3

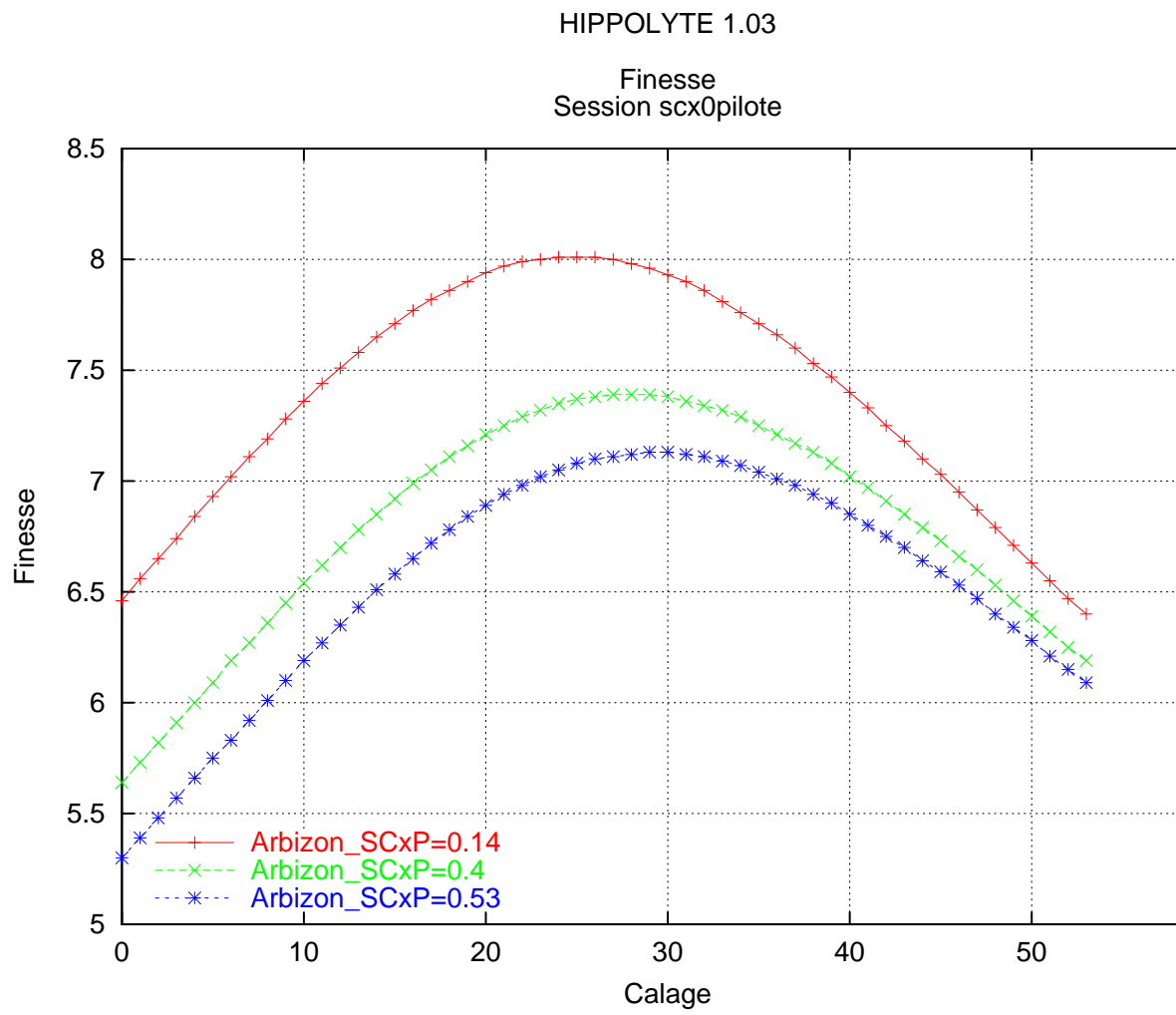
#je fais varier le SCxS du pilote de 0.14 à 0.53
CONFIG1
  FICHER D'ENTREE          arbizon.lis
  SCX DU PILOTE            0.14
  NOM DE LA VOILE          Arbizon_SCxP=0.14
CONFIG2
  FICHER D'ENTREE          arbizon.lis
  SCX DU PILOTE            0.4

```

2.9 Influence du SCx pilote

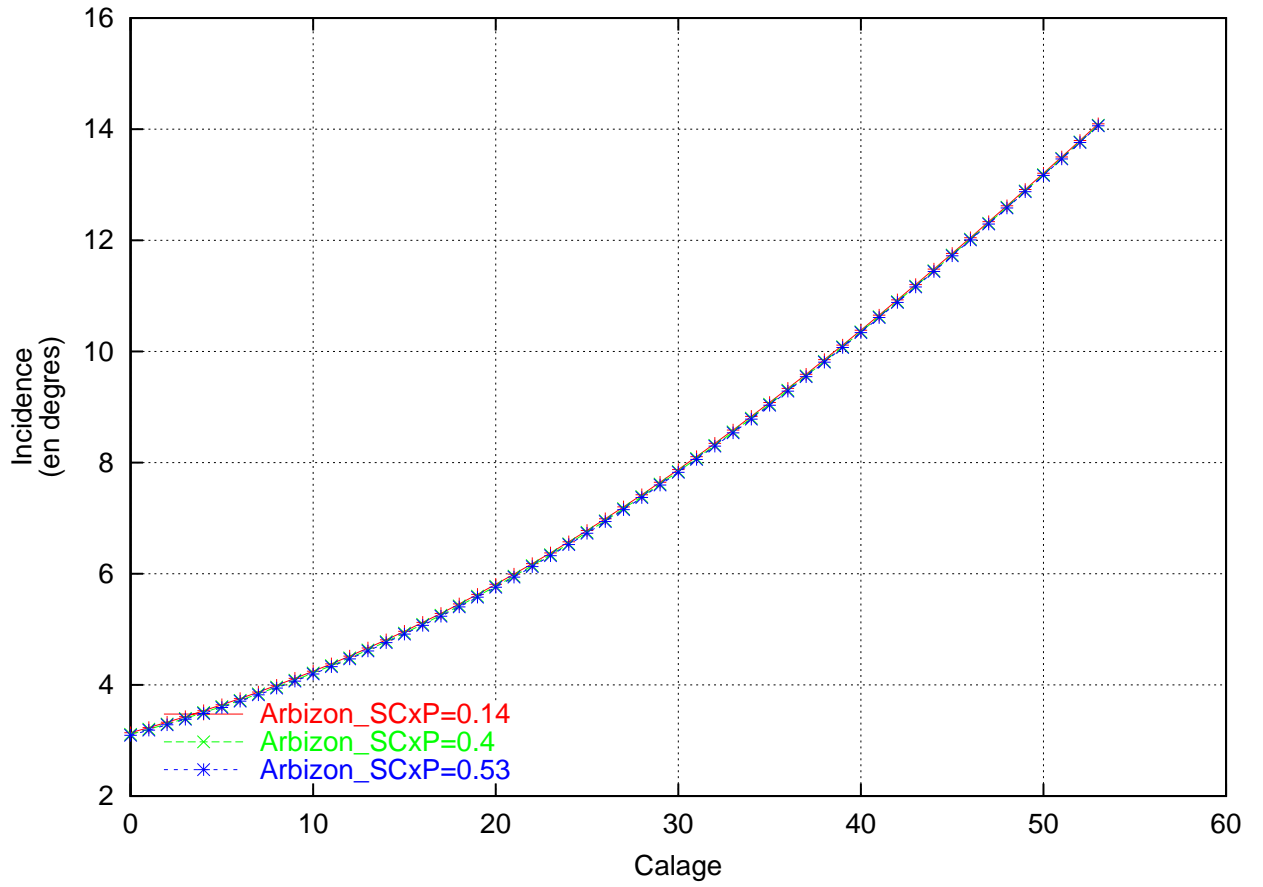
```
NOM DE LA VOILE      Arbizon_SCxP=0.4
CONFIG3
FICHER D'ENTREE      arbizon.lis
SCX DU PILOTE        0.53
NOM DE LA VOILE      Arbizon_SCxP=0.53
END
```

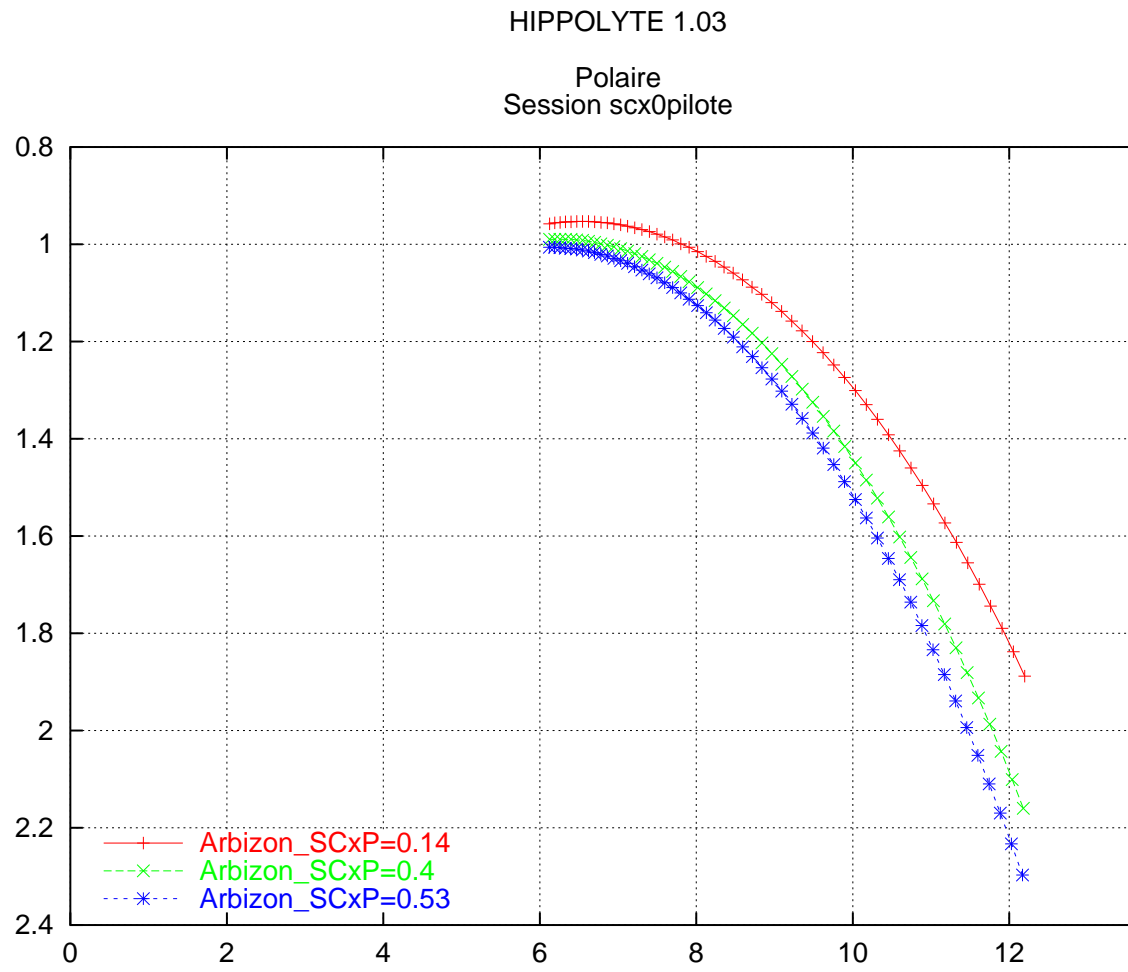




HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session scx0pilote

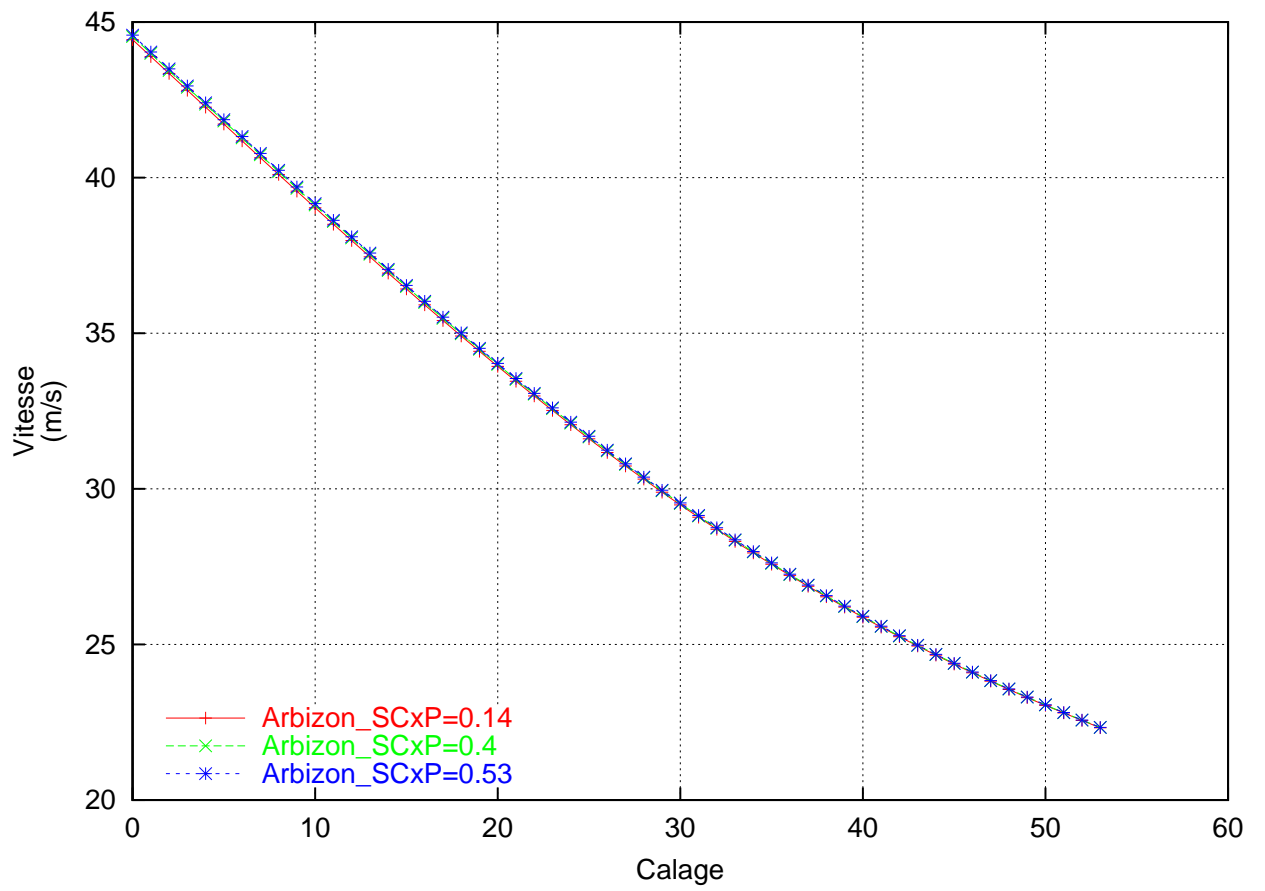


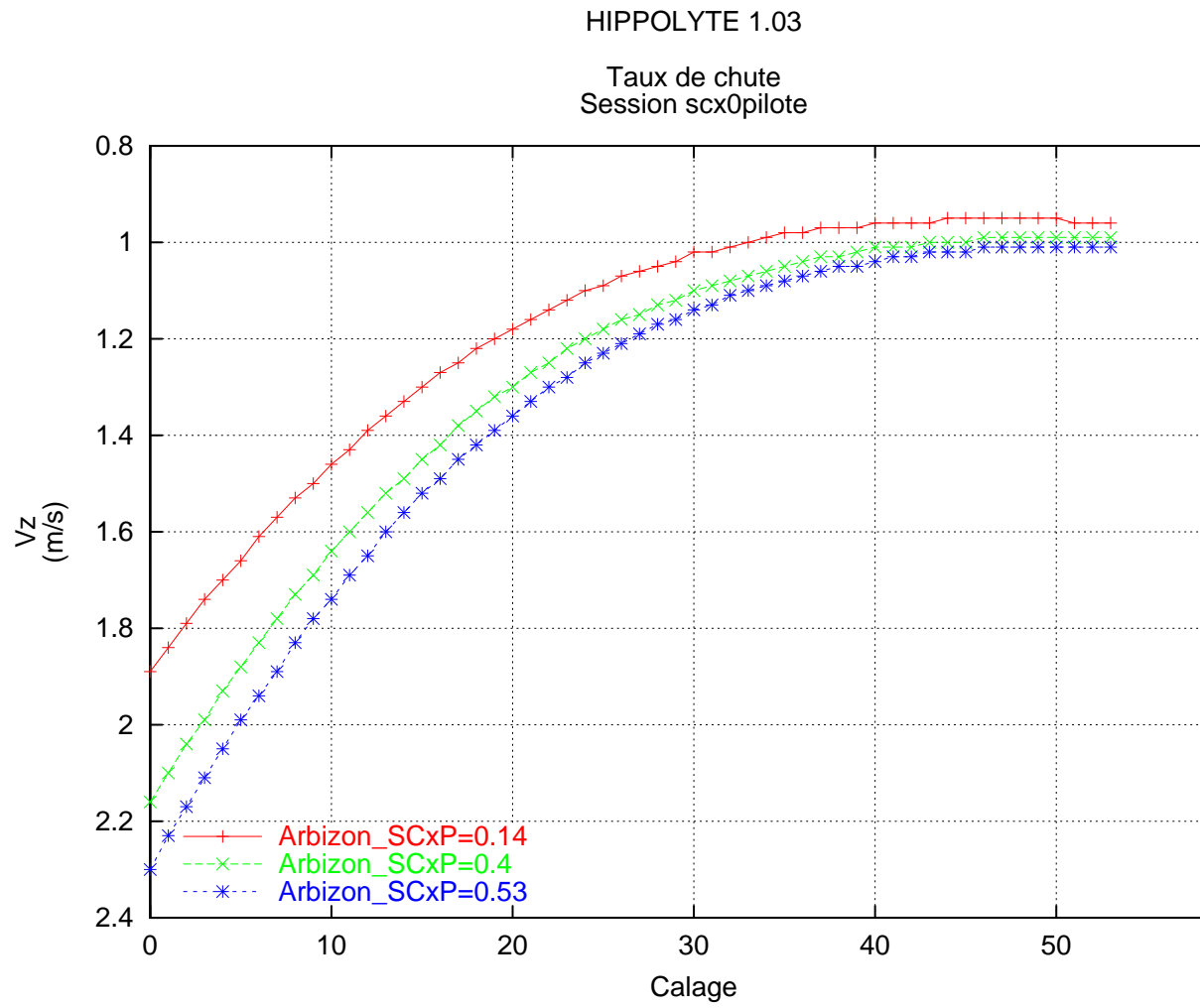


2.9 Influence du SCx pilote

HIPPOLYTE 1.03

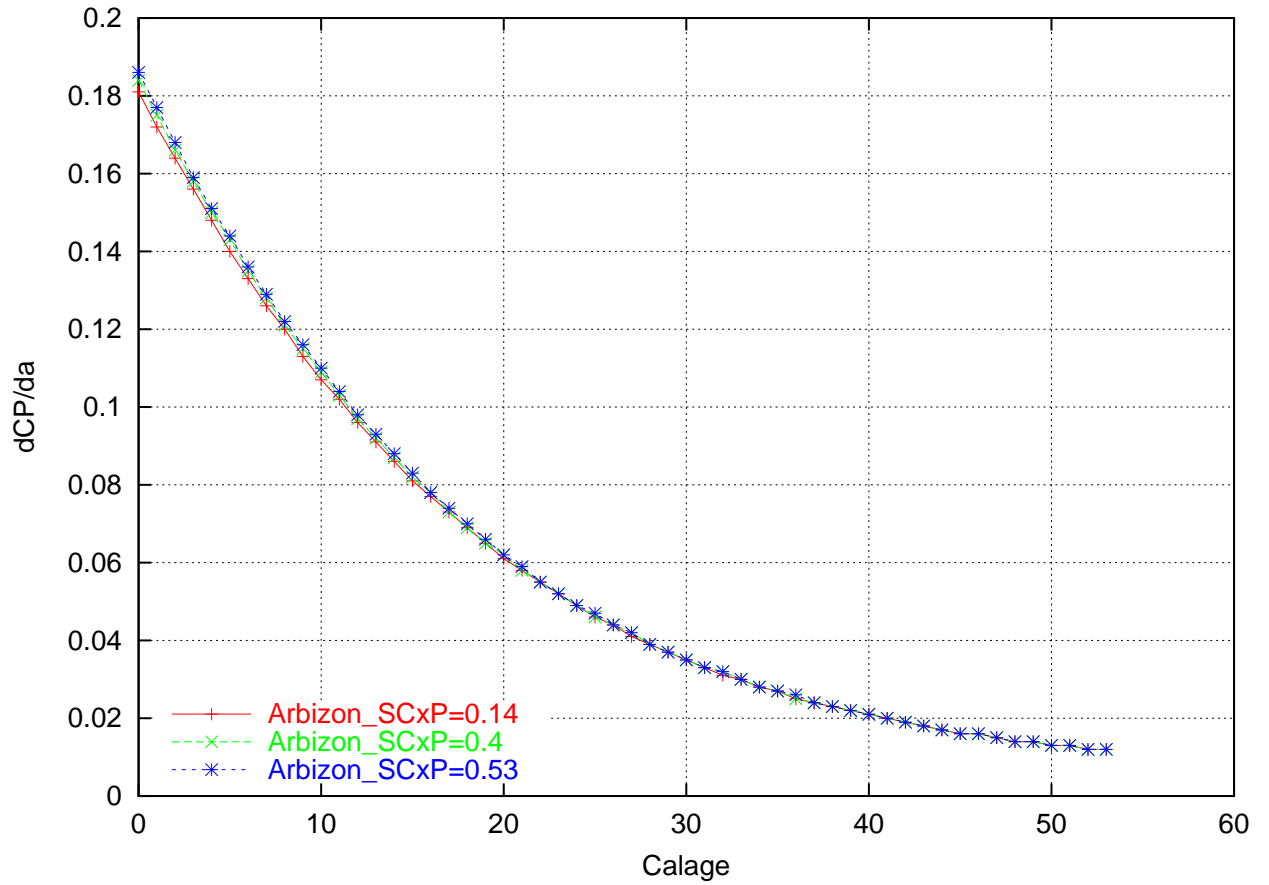
Vitesse
(m/s)
Session scx0pilote





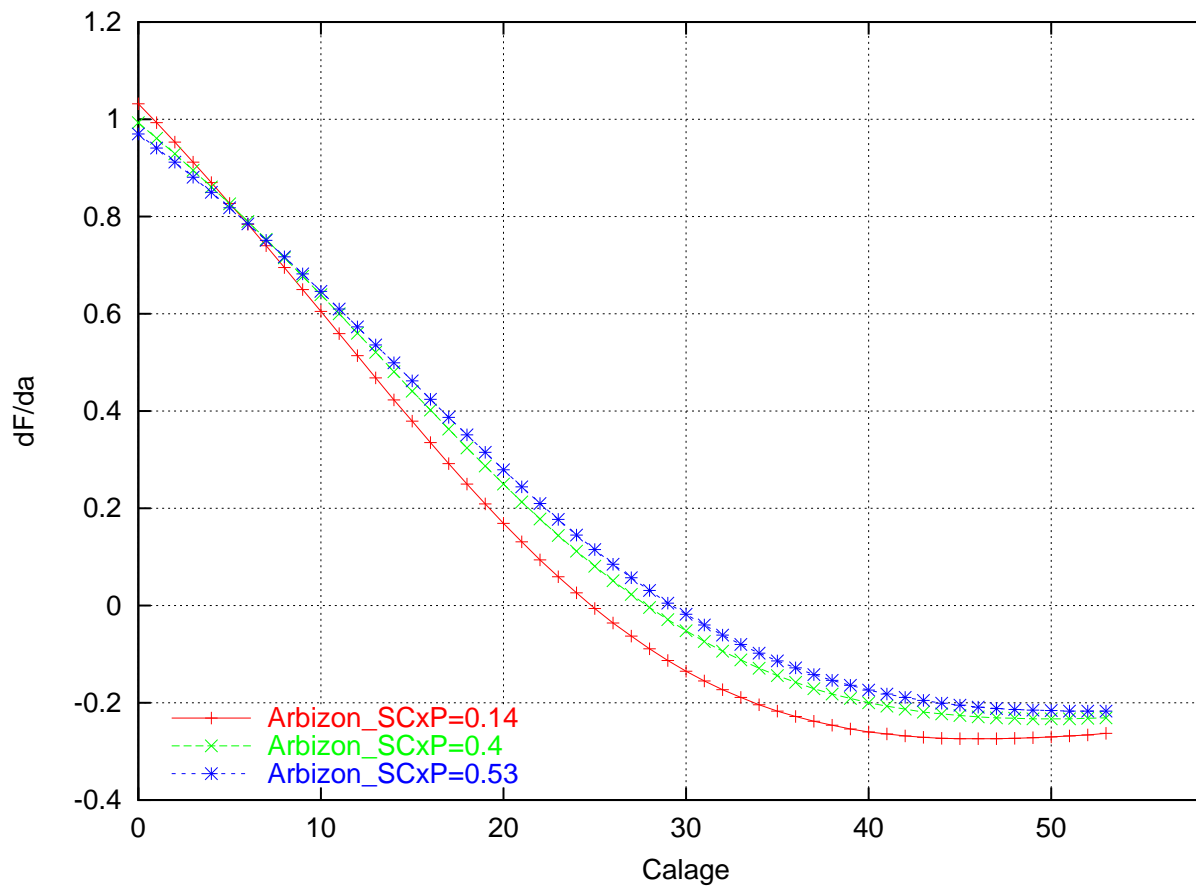
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session scx0pilote



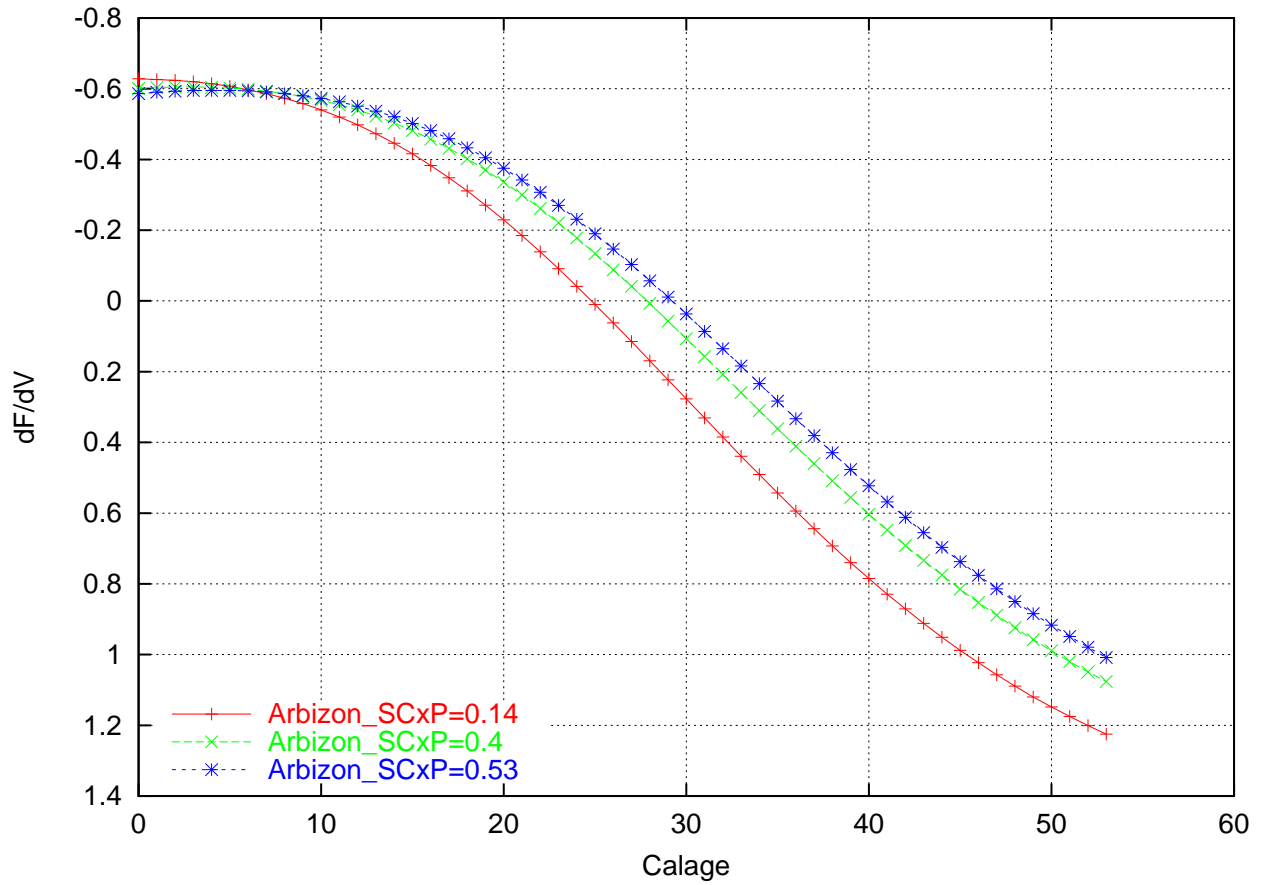
HIPPOLYTE 1.03

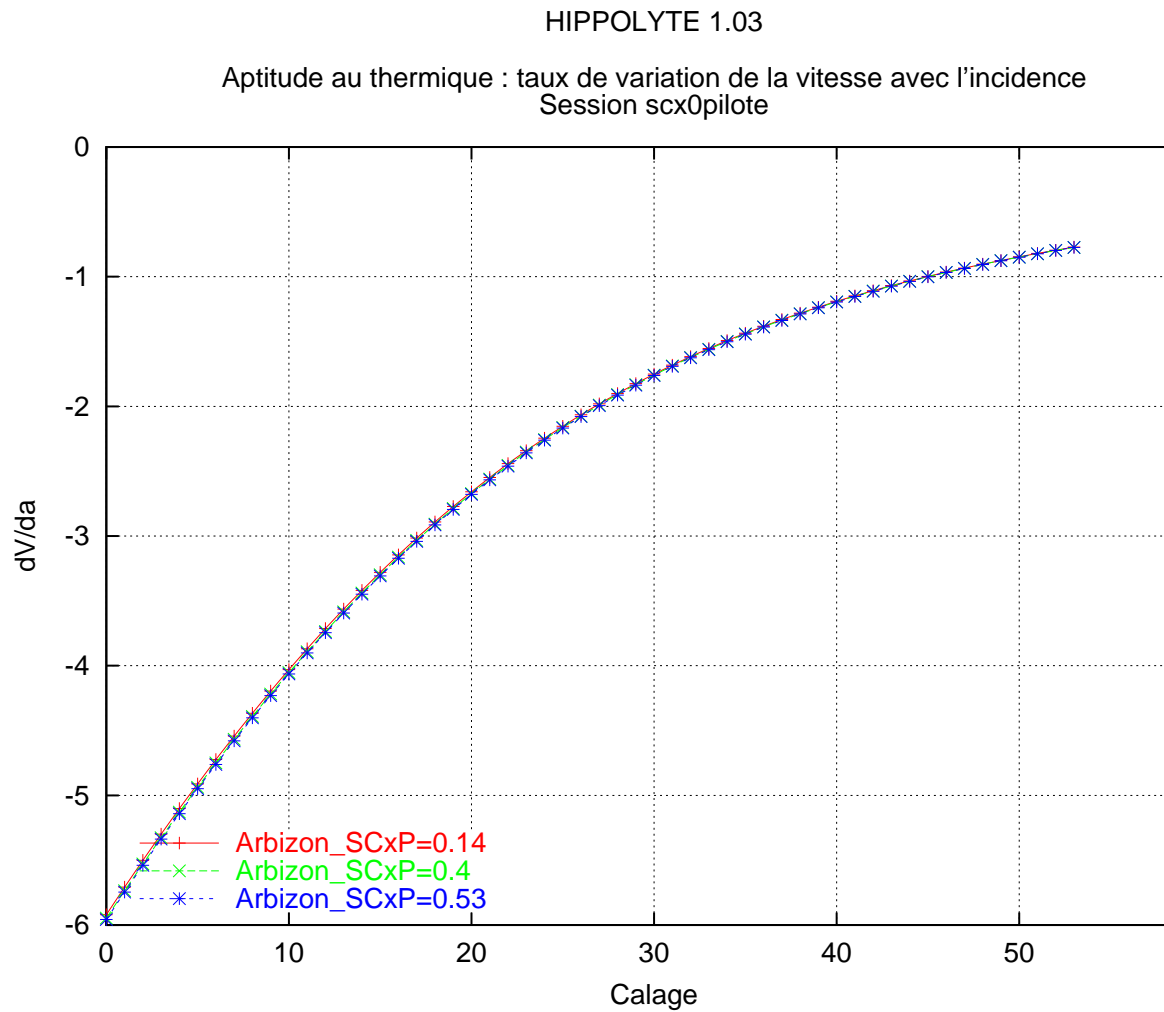
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session scx0pilote



HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session scx0pilote





2.10 Influence du SCx0 de la voile

2.10.1 Profil à centrage avant

Le fichier de données est le suivant :

```

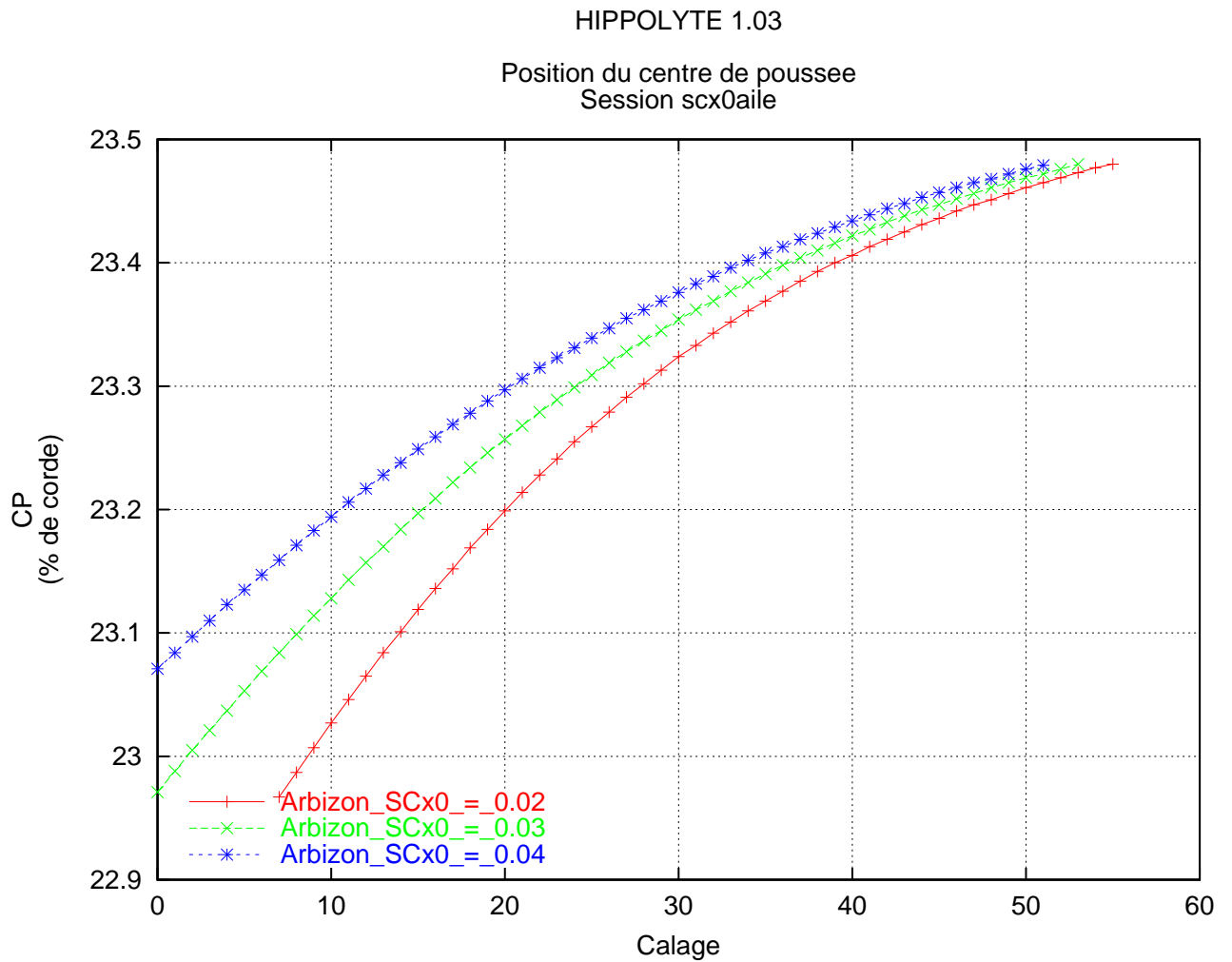
NOMBRE DE CONFIG          3

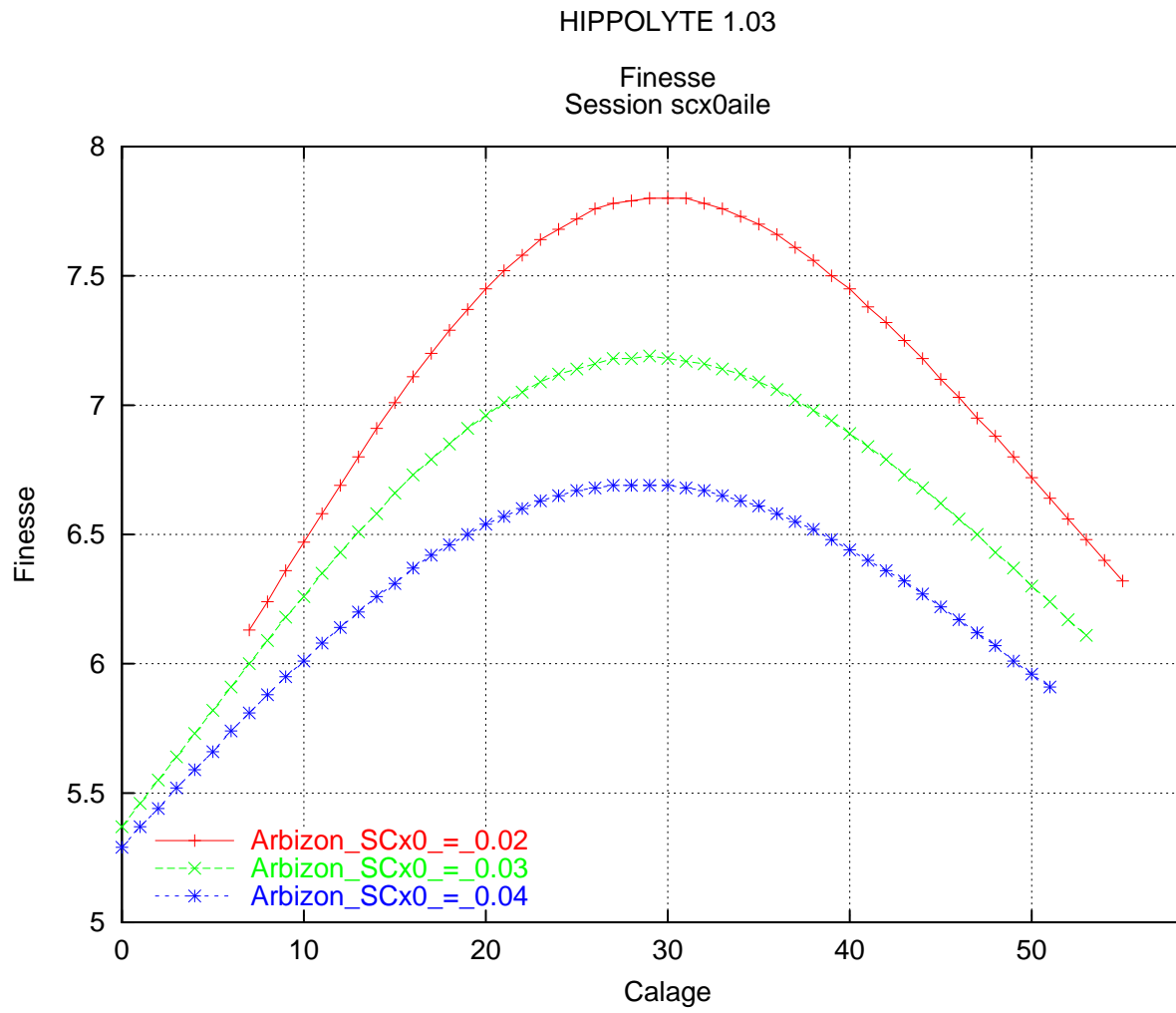
#je fais varier le sCx0 de l'aile de 0.02 à 0.04
CONFIG1
  CXOA                      0.02
  FICHIER D'ENTREE          arbizon.lis
  NOM DE LA VOILE           Arbizon_SCx0=_0.02
CONFIG2
  CXOA                      0.03

```

2.10 Influence du SCx0 de la voile

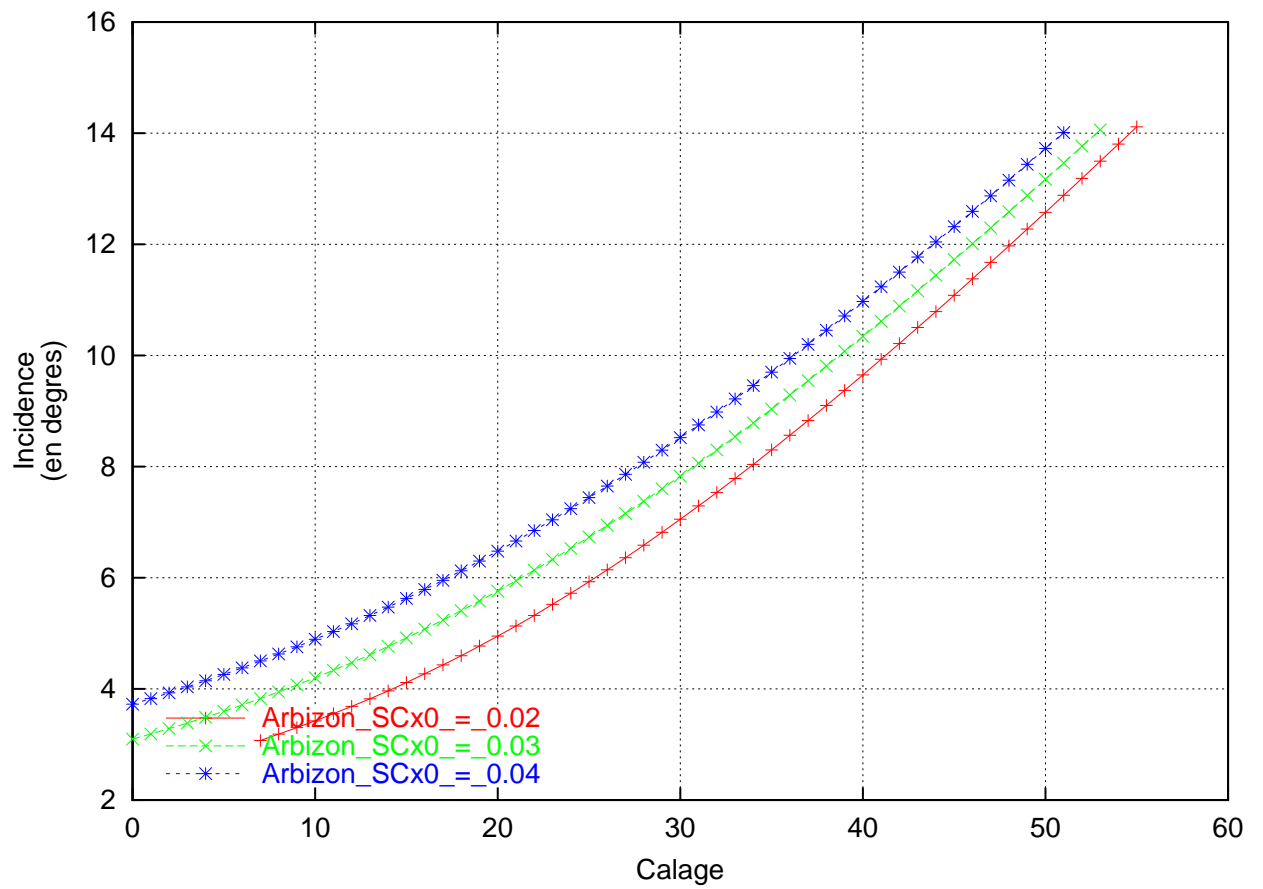
```
FICHER D'ENTREE      arbizon.lis
NOM DE LA VOILE     Arbizon_SCx0=_0.03
CONFIG3
CXOA                 0.04
FICHER D'ENTREE     arbizon.lis
NOM DE LA VOILE     Arbizon_SCx0=_0.04
END
```

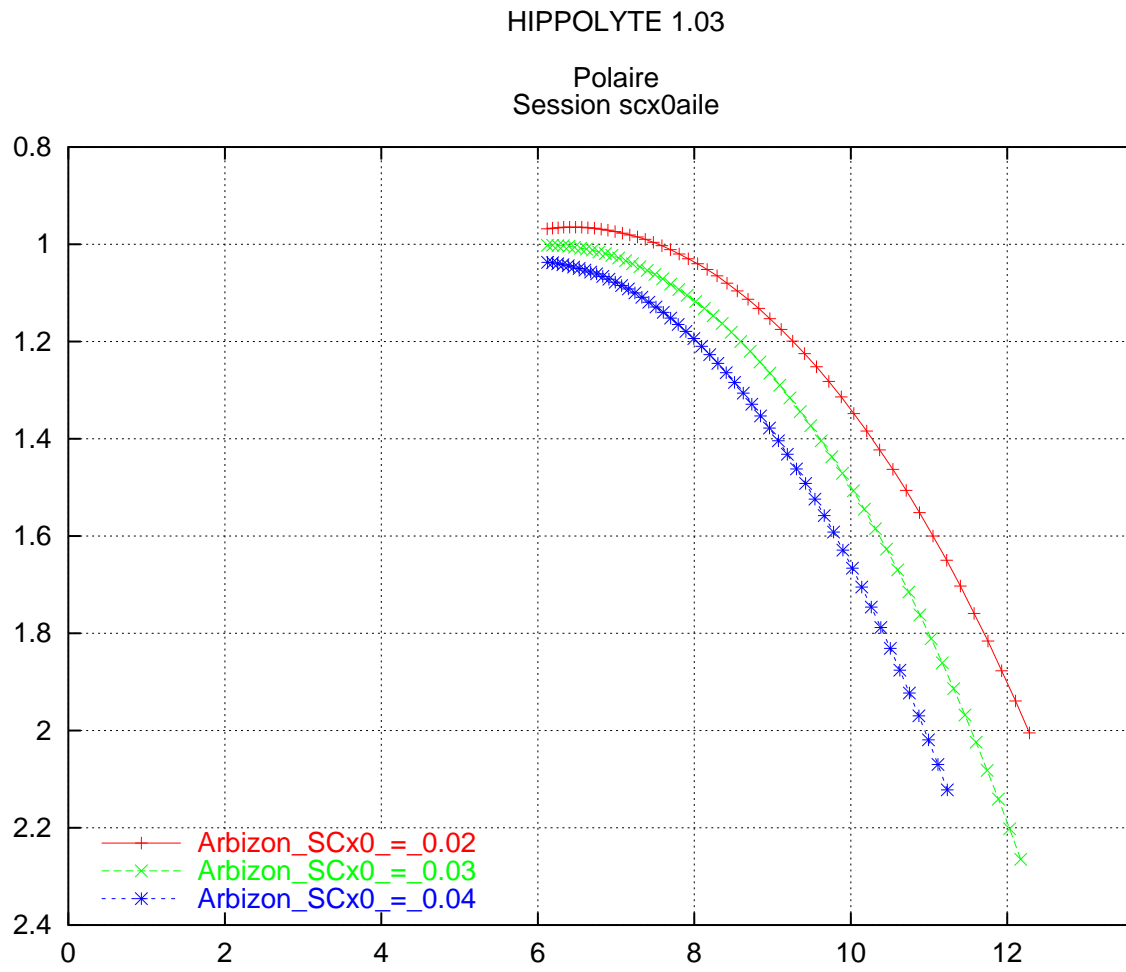




HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session scx0aile

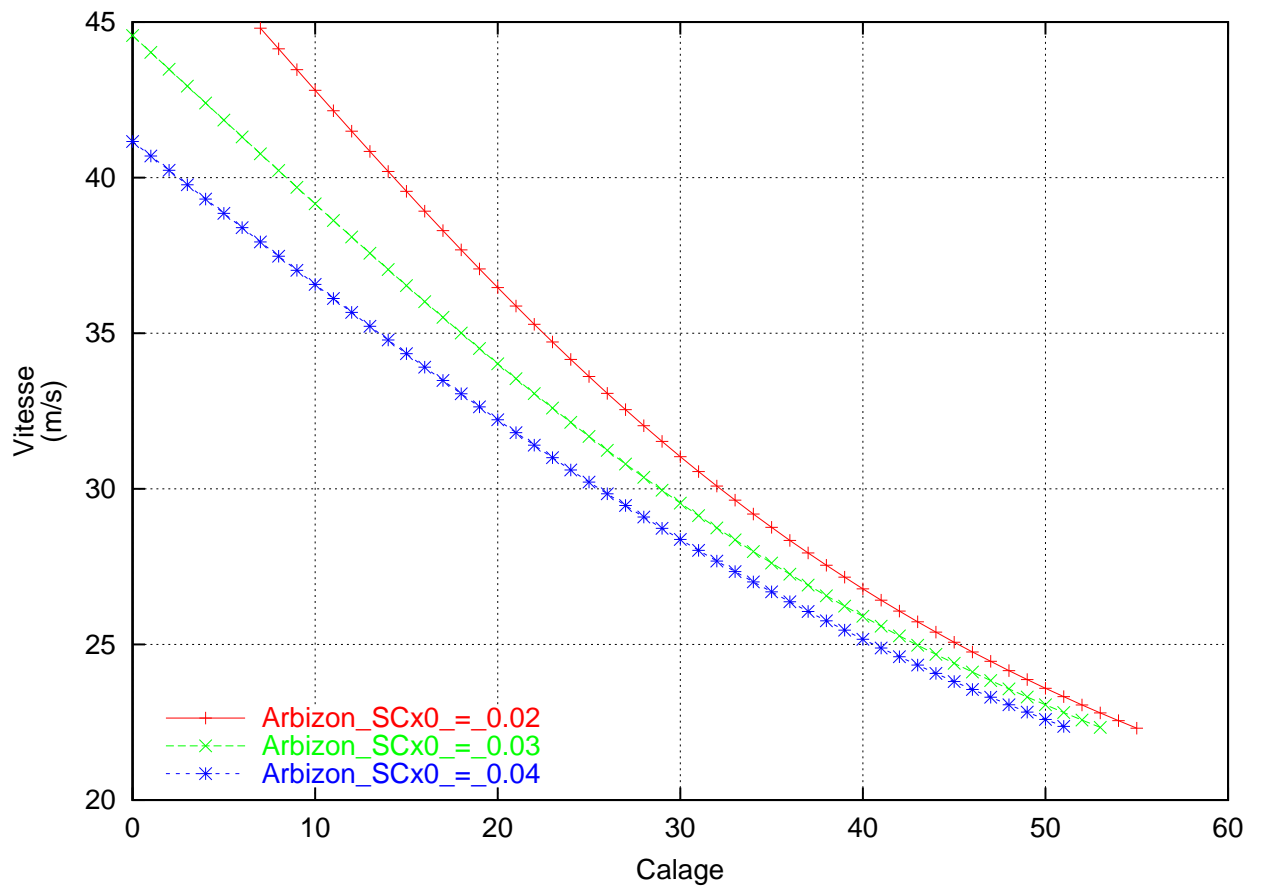


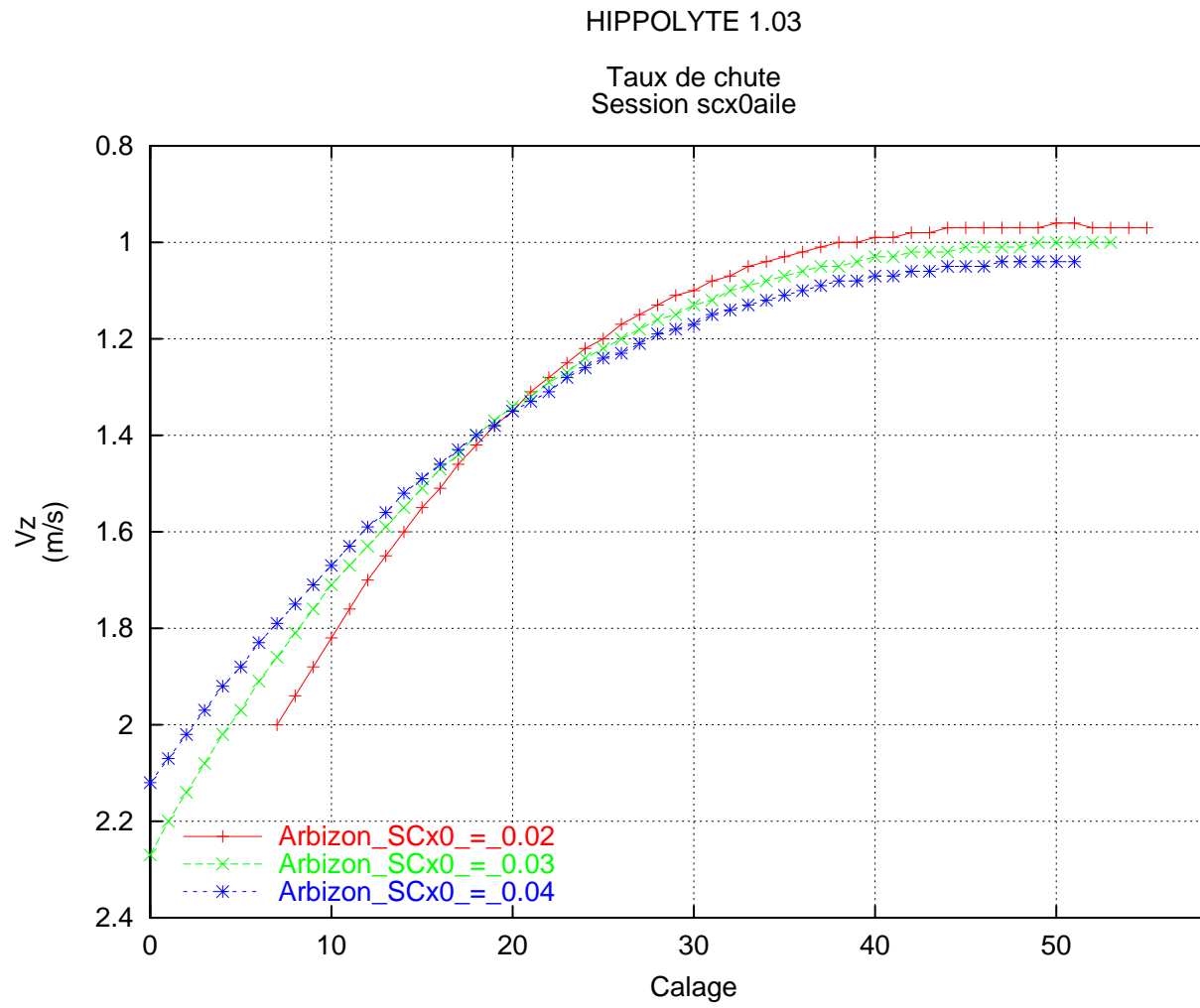


2.10 Influence du SCx0 de la voile

HIPPOLYTE 1.03

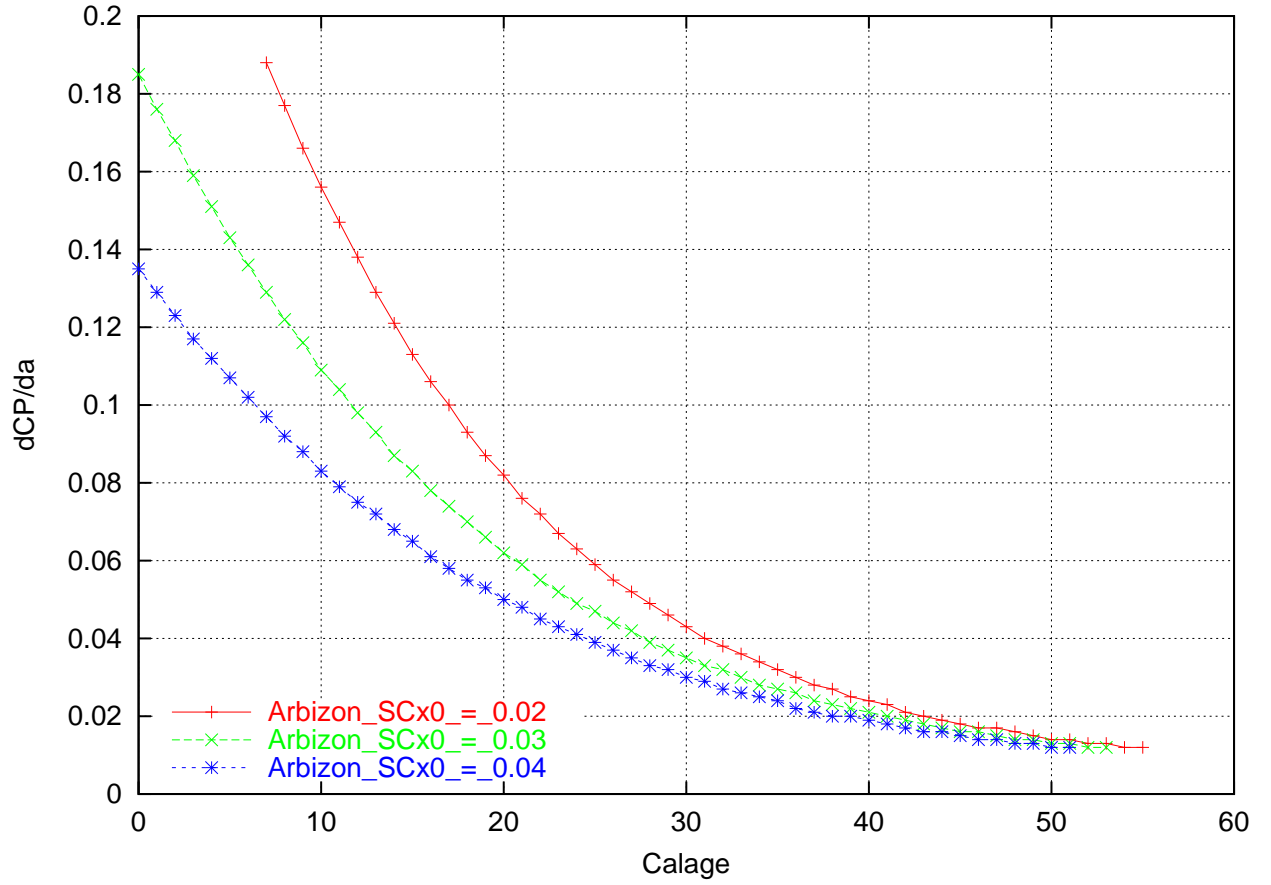
Vitesse
(m/s)
Session scx0aile





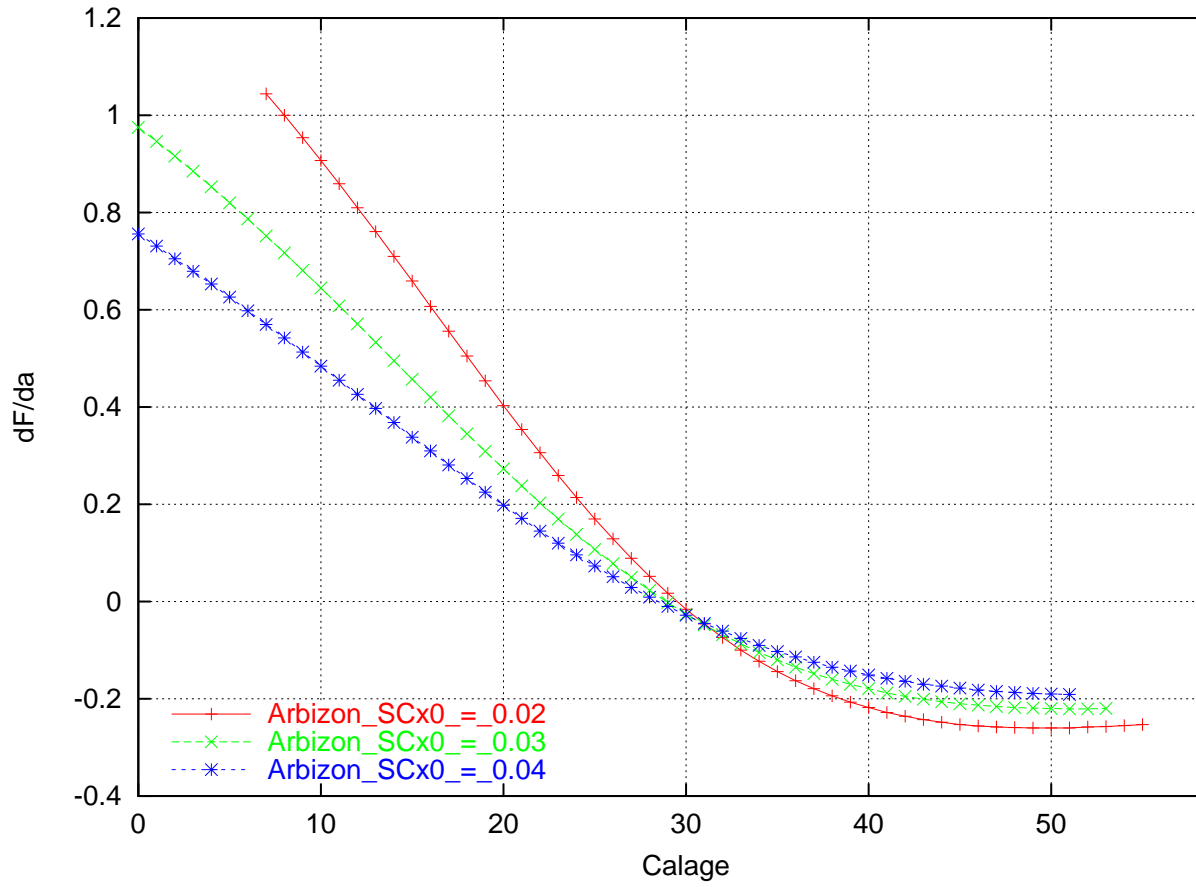
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de pousse avec l'incidence
Session scx0aile



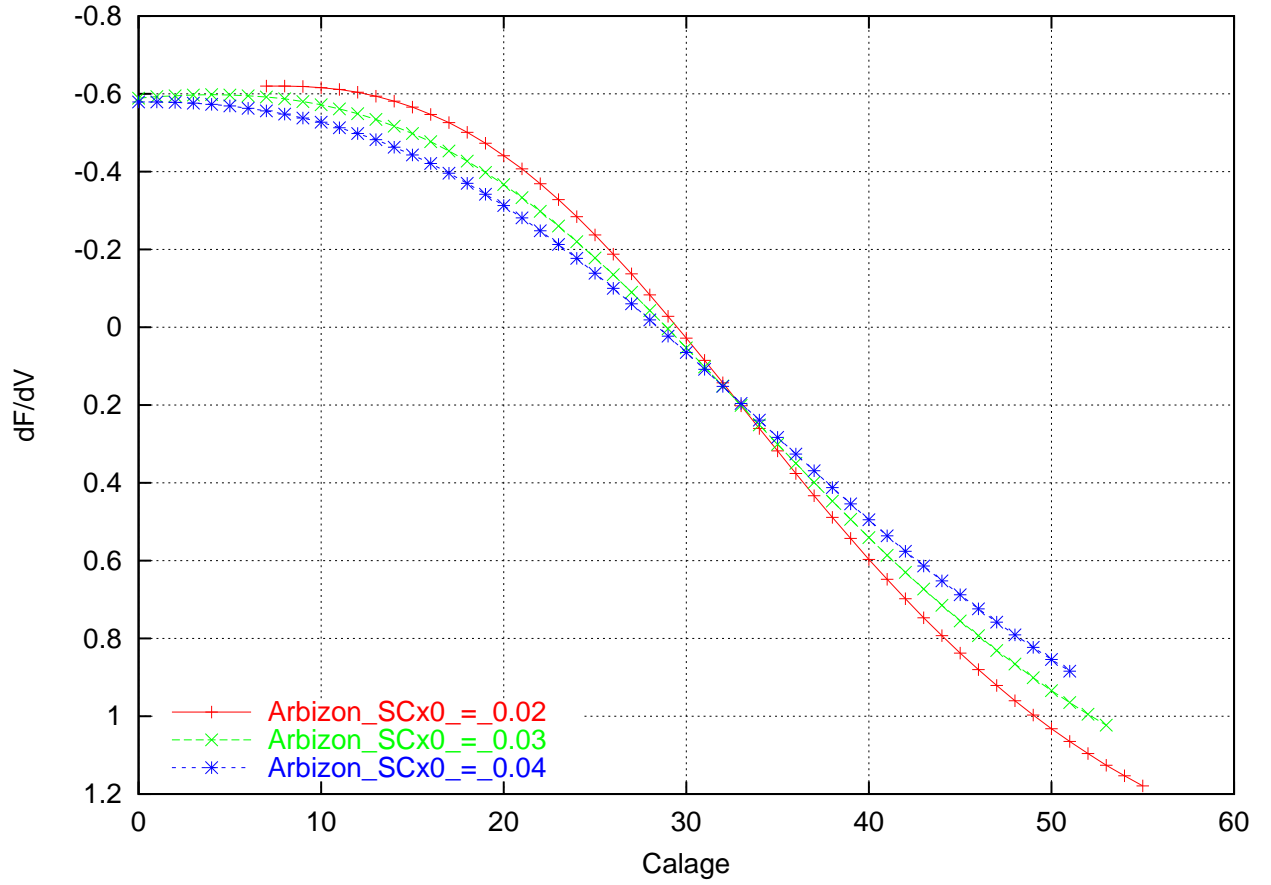
HIPPOLYTE 1.03

Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session scx0aile



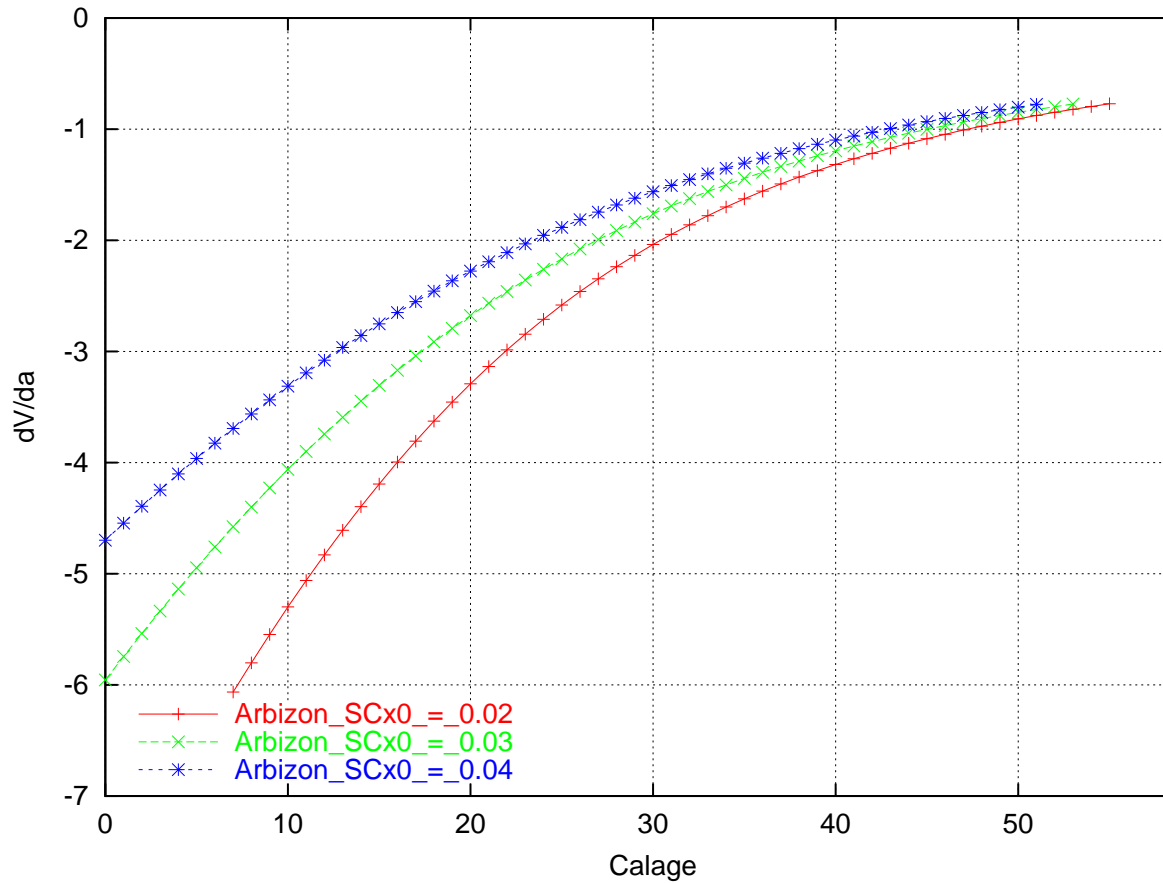
HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session scx0aile



HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session scx0aile



2.10.2 profil à centrage arrière

Le fichier de données est le suivant :

NOMBRE DE CONFIG 3

#je fais varier le scx0 de l'aile de 0.02 à 0.04, profil ibis

CONFIG1

CXOA	0.02
FICHER D'ENTREE	ibis.lis
NOM DE LA VOILE	Ibis_SCx0=0.02

CONFIG2

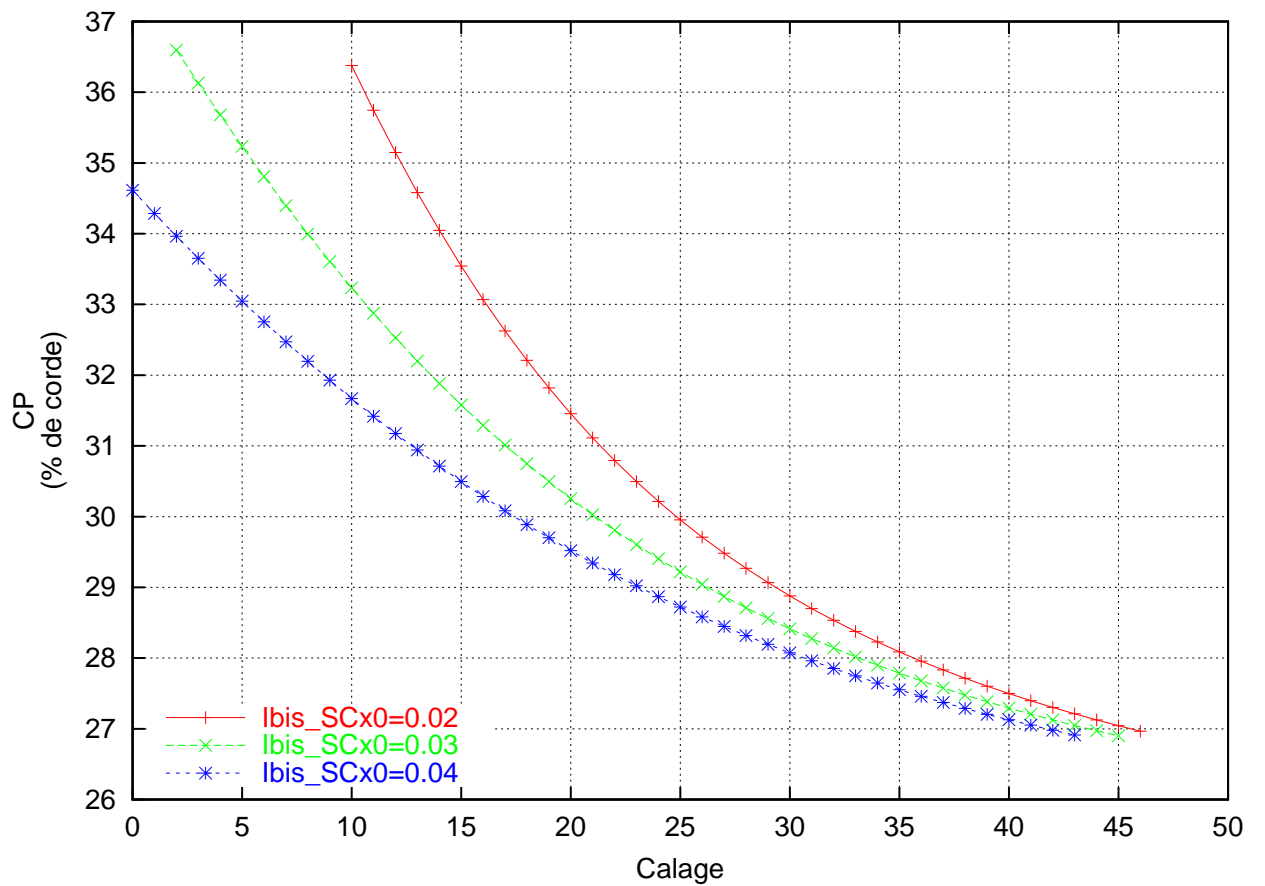
CXOA	0.03
FICHER D'ENTREE	ibis.lis
NOM DE LA VOILE	Ibis_SCx0=0.03

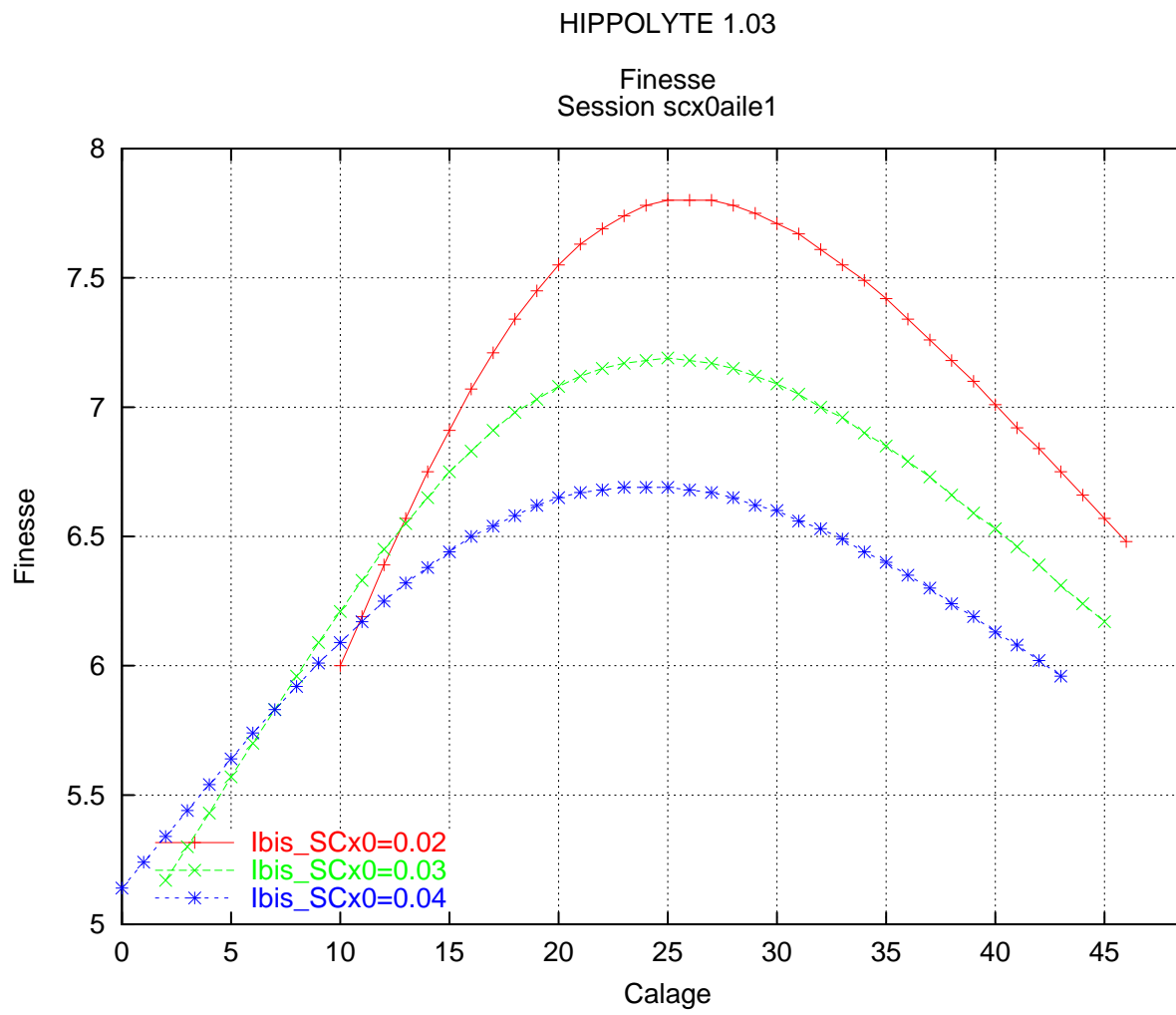
2.10 Influence du SCx0 de la voile

```
CONFIG3
  CXOA                0.04
  FICHIER D'ENTREE   ibis.lis
  NOM DE LA VOILE    Ibis_SCx0=0.04
END
```

HIPPOLYTE 1.03

Position du centre de pousse
Session scx0aile1

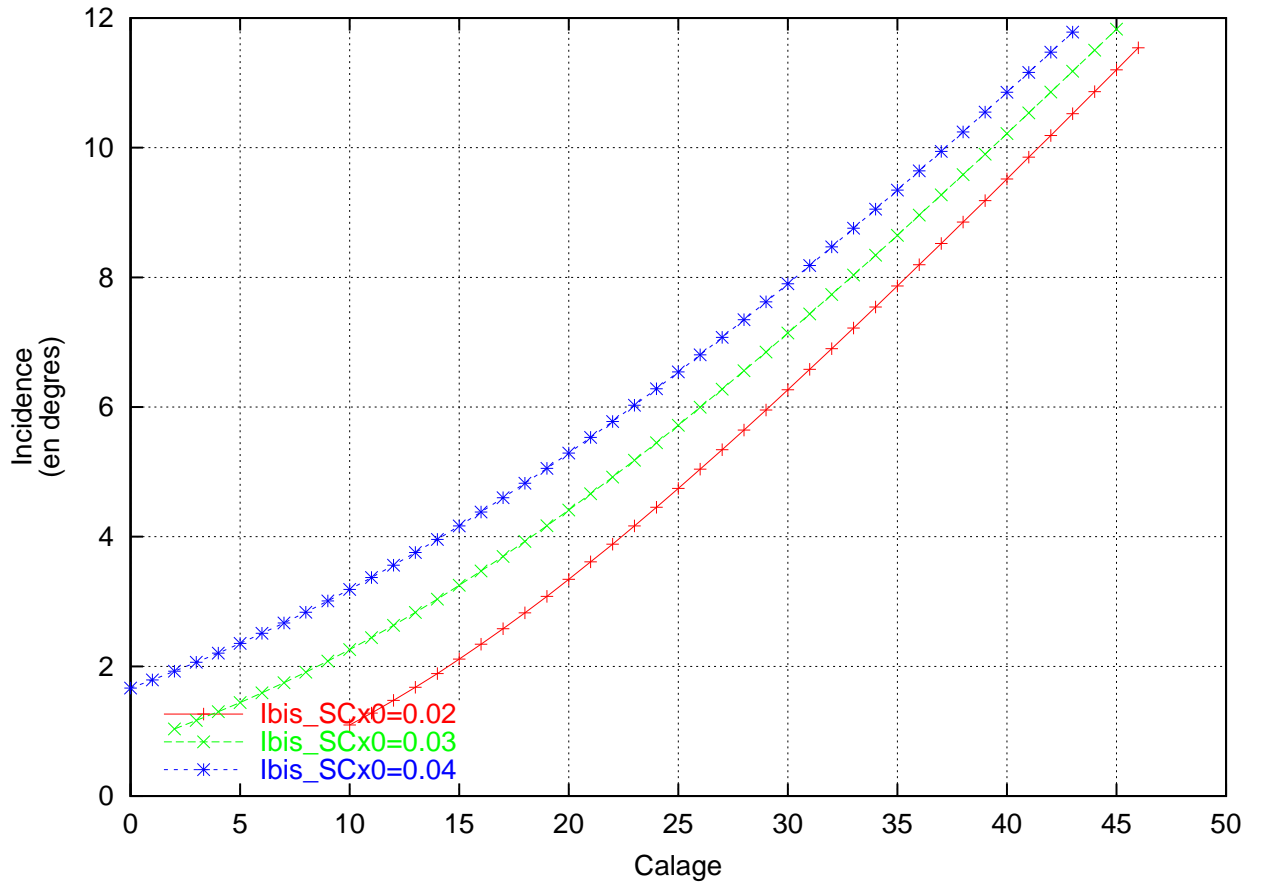


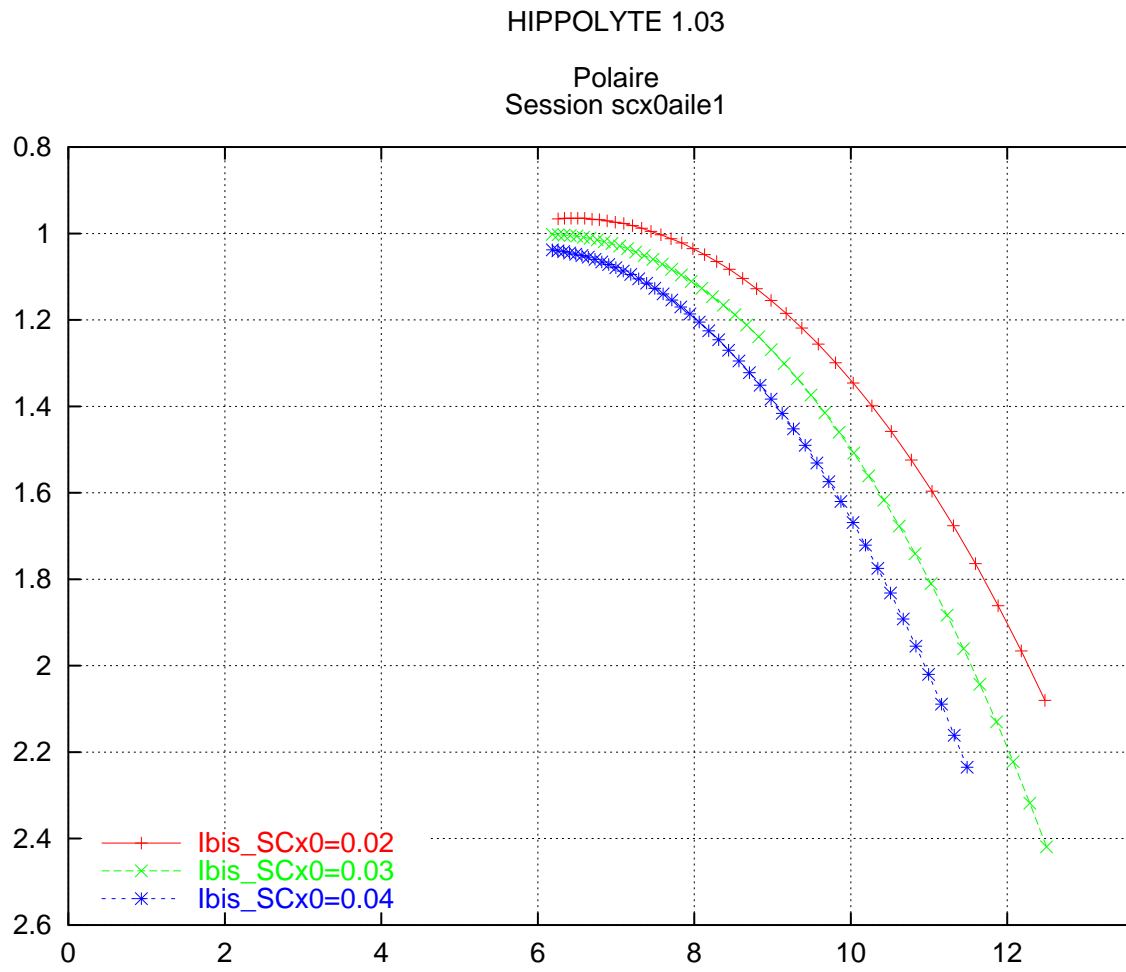


2.10 Influence du SCx0 de la voile

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session scx0aile1

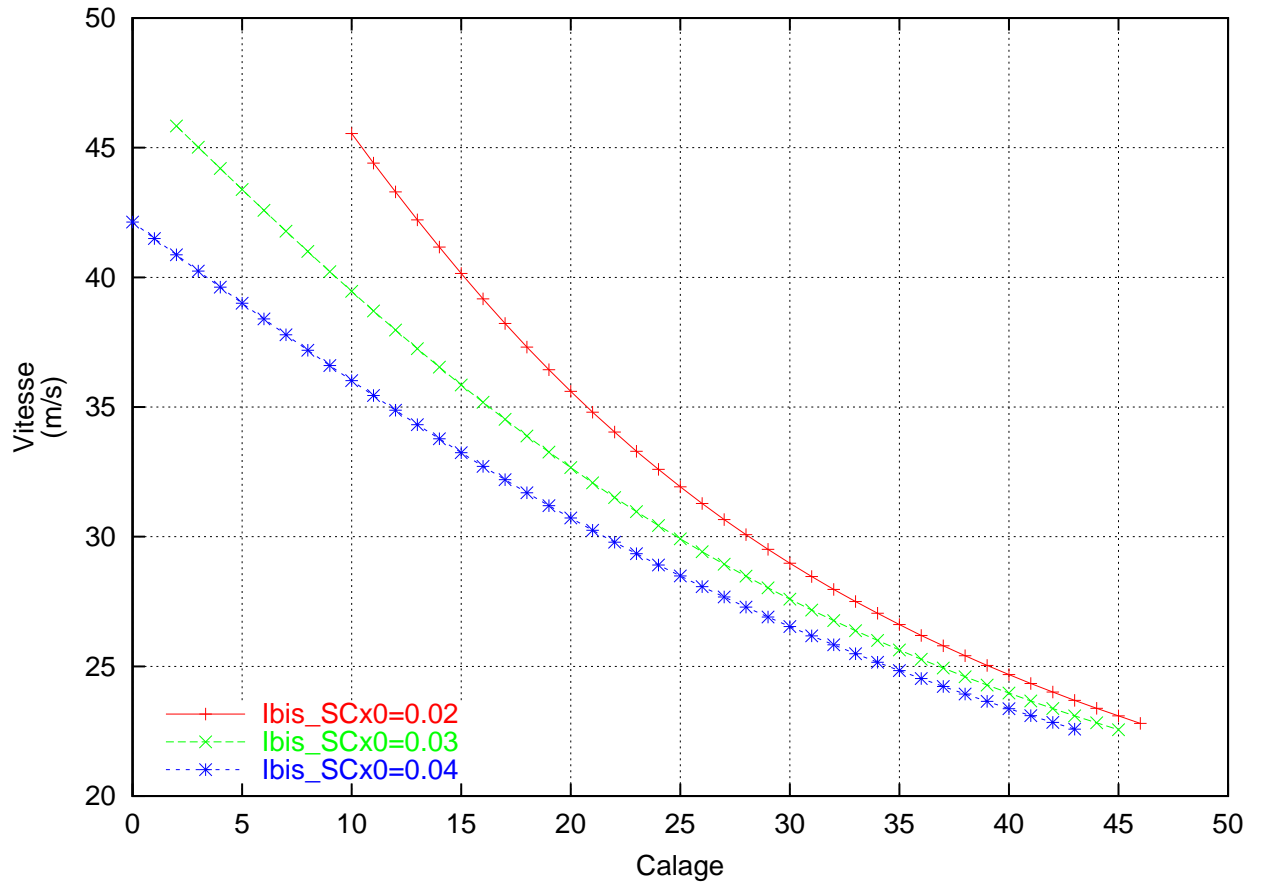


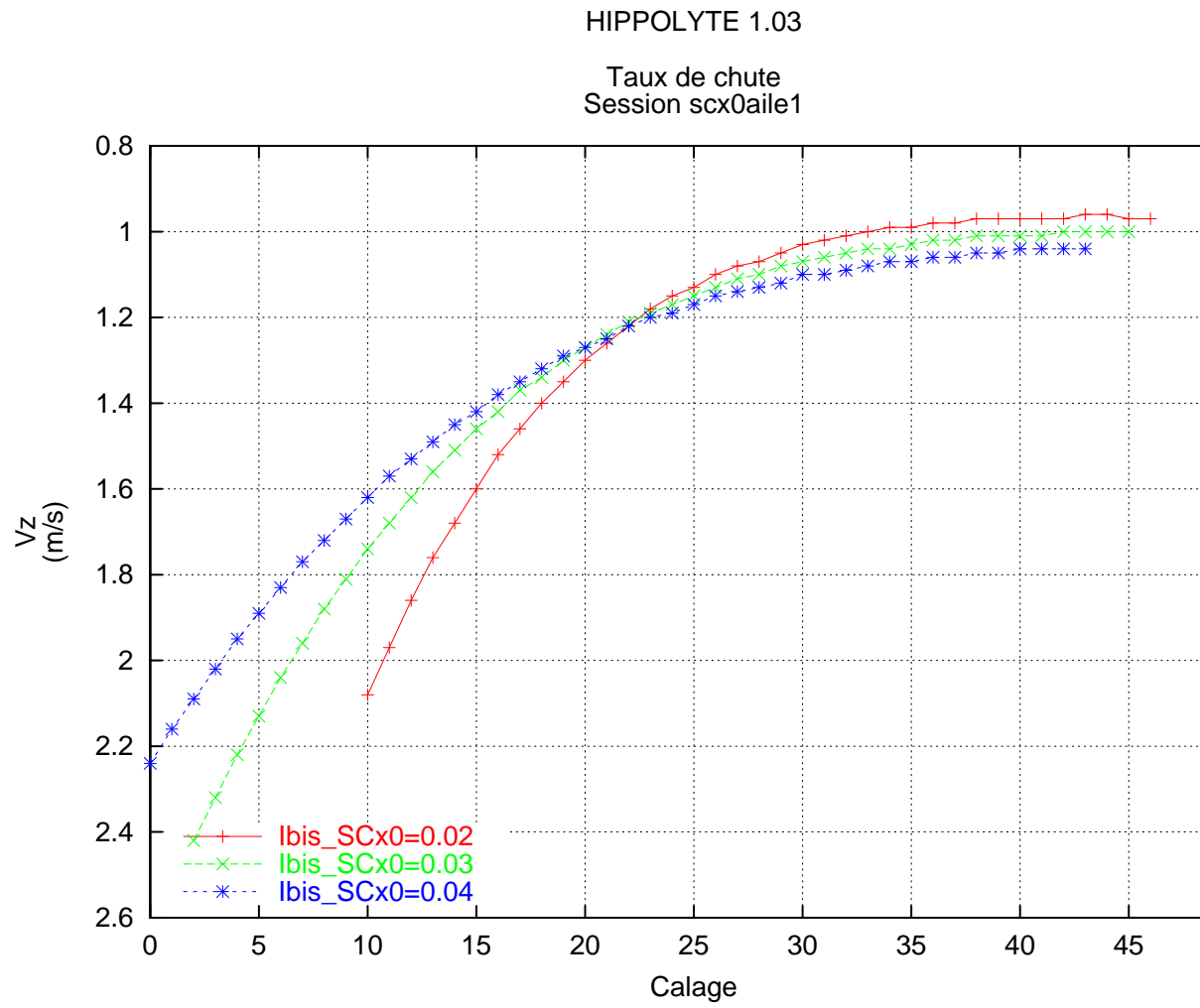


2.10 Influence du SCx0 de la voile

HIPPOLYTE 1.03

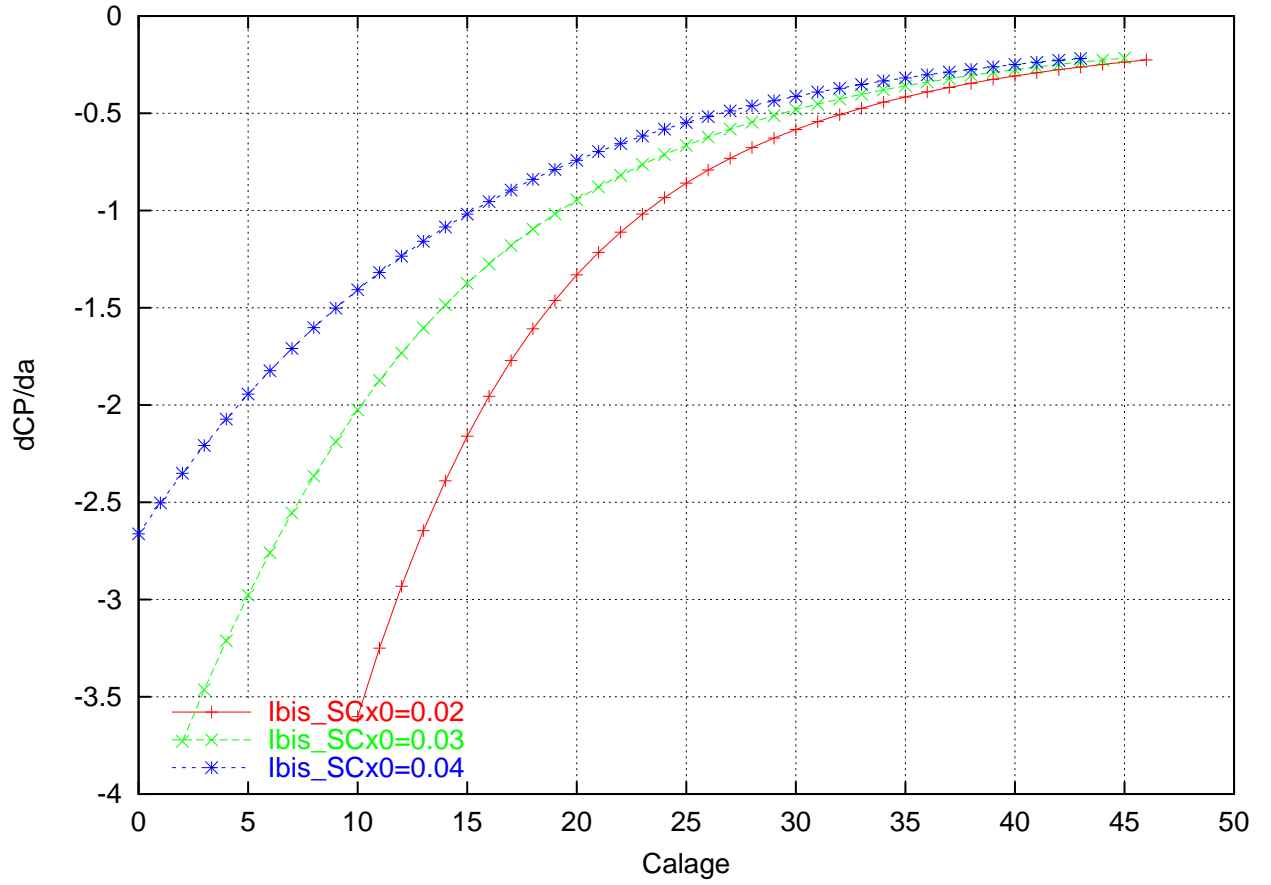
Vitesse
(m/s)
Session scx0aile1

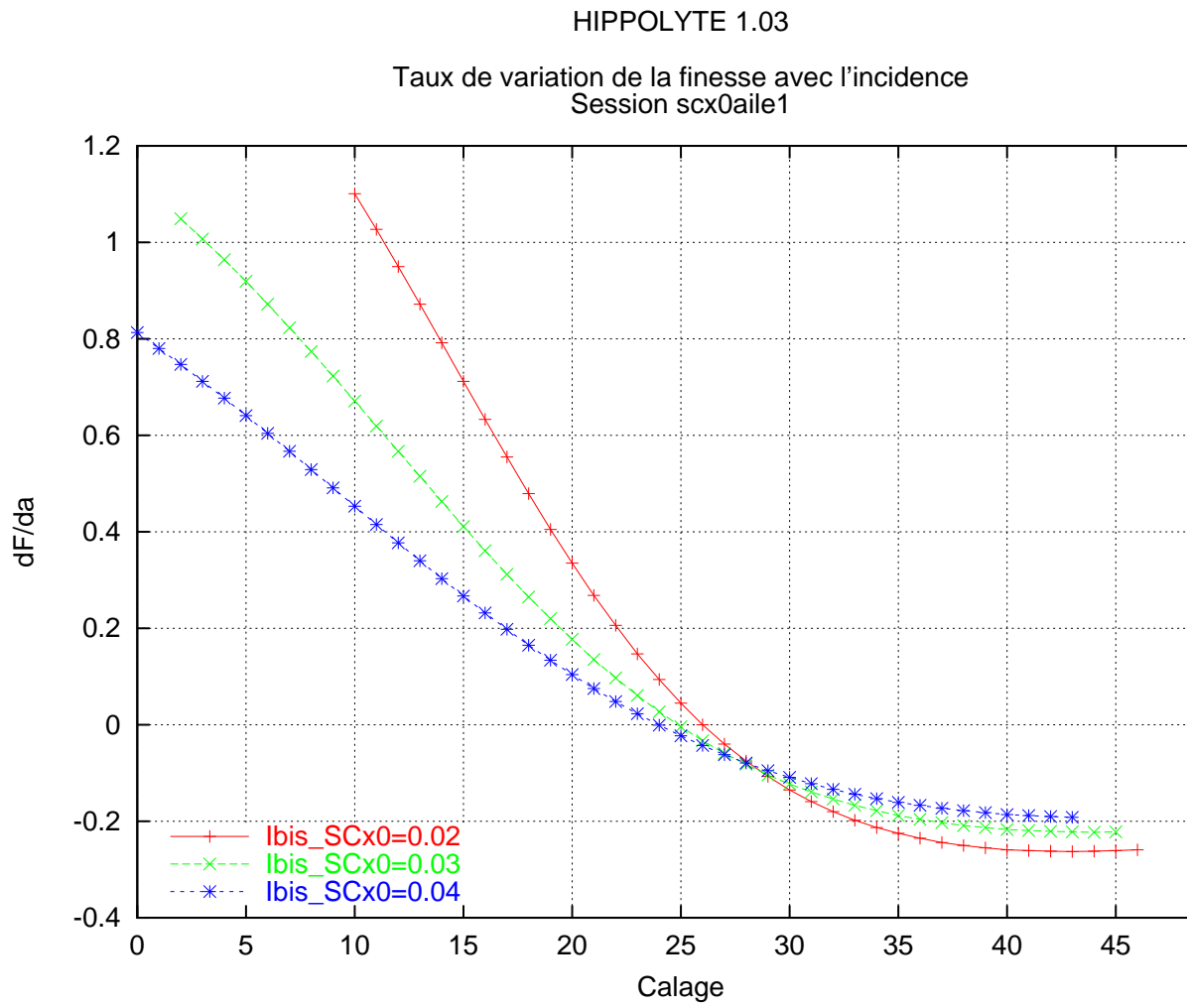




HIPPOLYTE 1.03

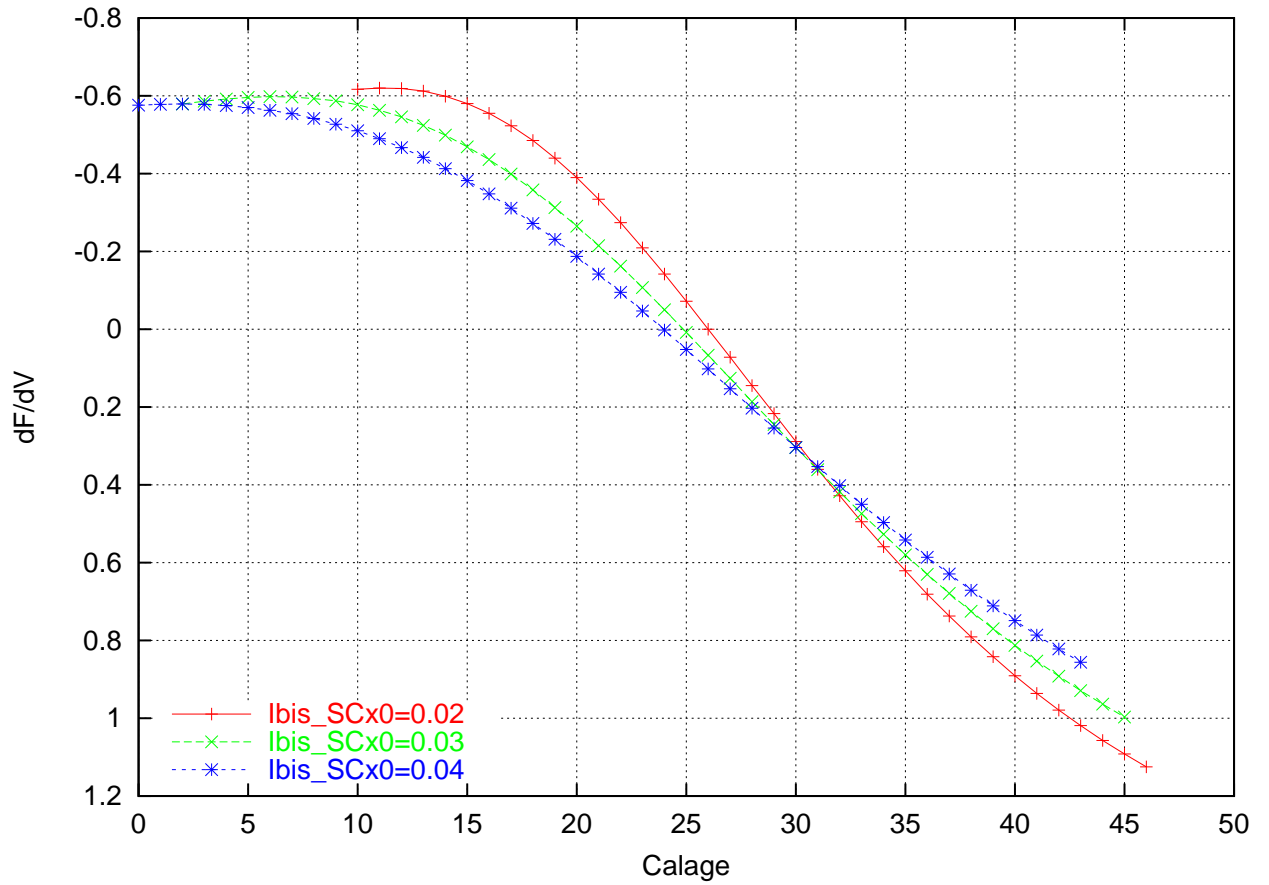
Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session scx0aile1

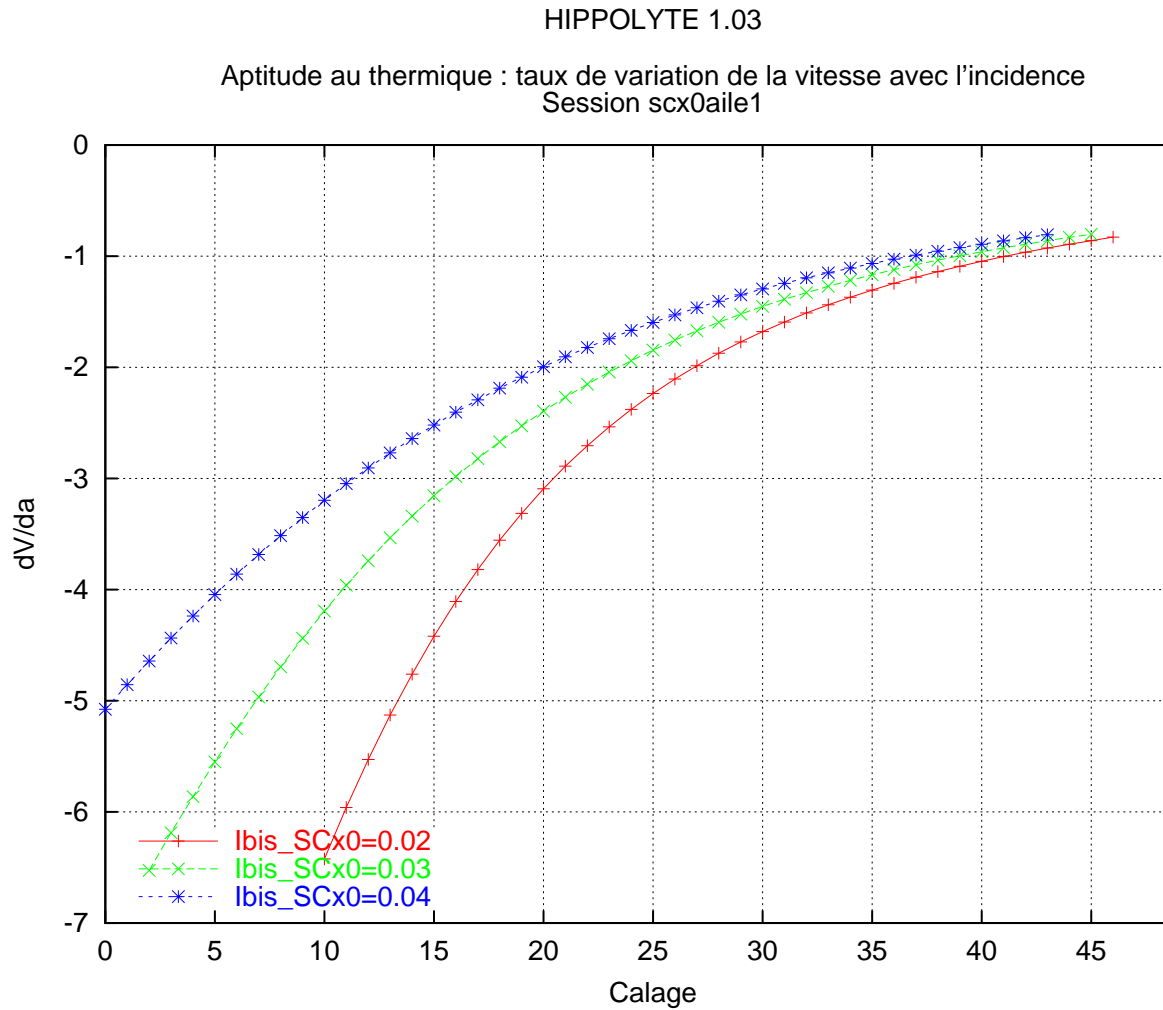




HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session scx0aile1





2.11 Influence du SCx0 des suspentes

Le fichier de données est le suivant :

NOMBRE DE CONFIG 3

#je fais varier le SCxS des suspentes de 0.4 à 0.6

CONFIG1

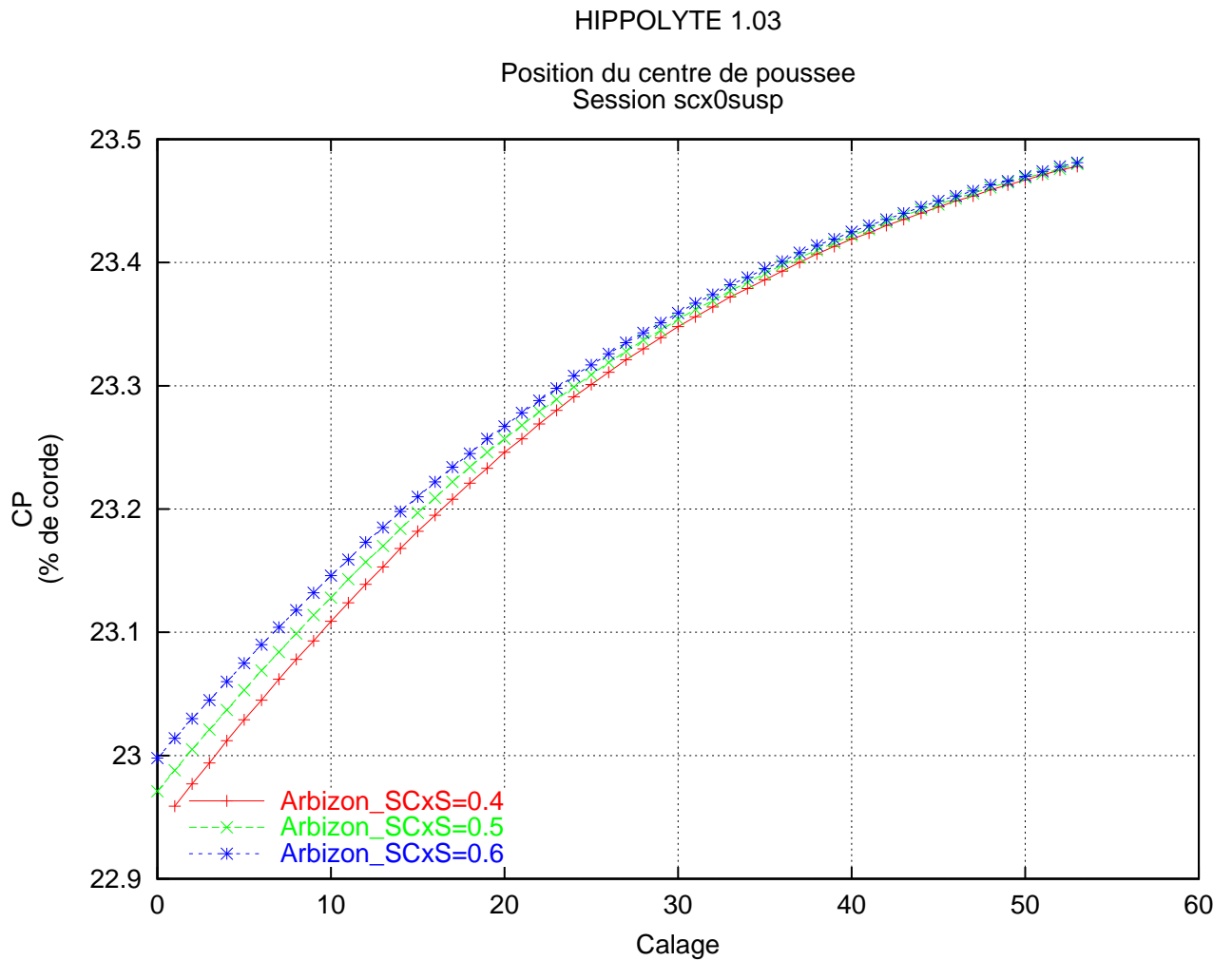
FICHIER D'ENTREE	arbizon.lis
SCX DU SUSPENTAGE	0.4
NOM DE LA VOILE	Arbizon_SCxS=0.4

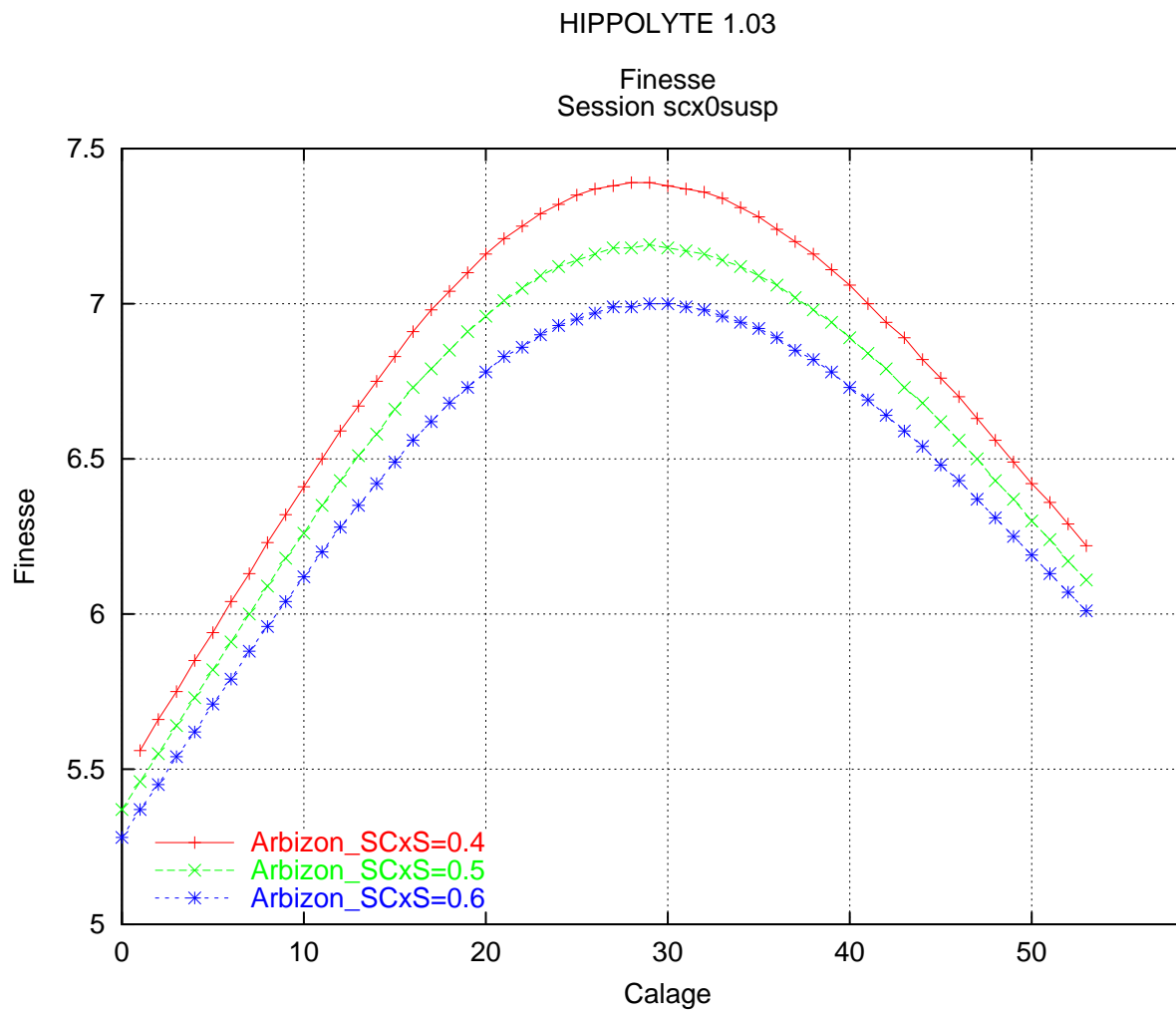
CONFIG2

FICHIER D'ENTREE	arbizon.lis
SCX DU SUSPENTAGE	0.5
NOM DE LA VOILE	Arbizon_SCxS=0.5

2.11 Influence du SCx0 des suspentes

```
CONFIG3
  FICHER D'ENTREE      arbizon.lis
  SCX DU SUSPENTAGE    0.6
  NOM DE LA VOILE      Arbizon_SCxS=0.6
END
```

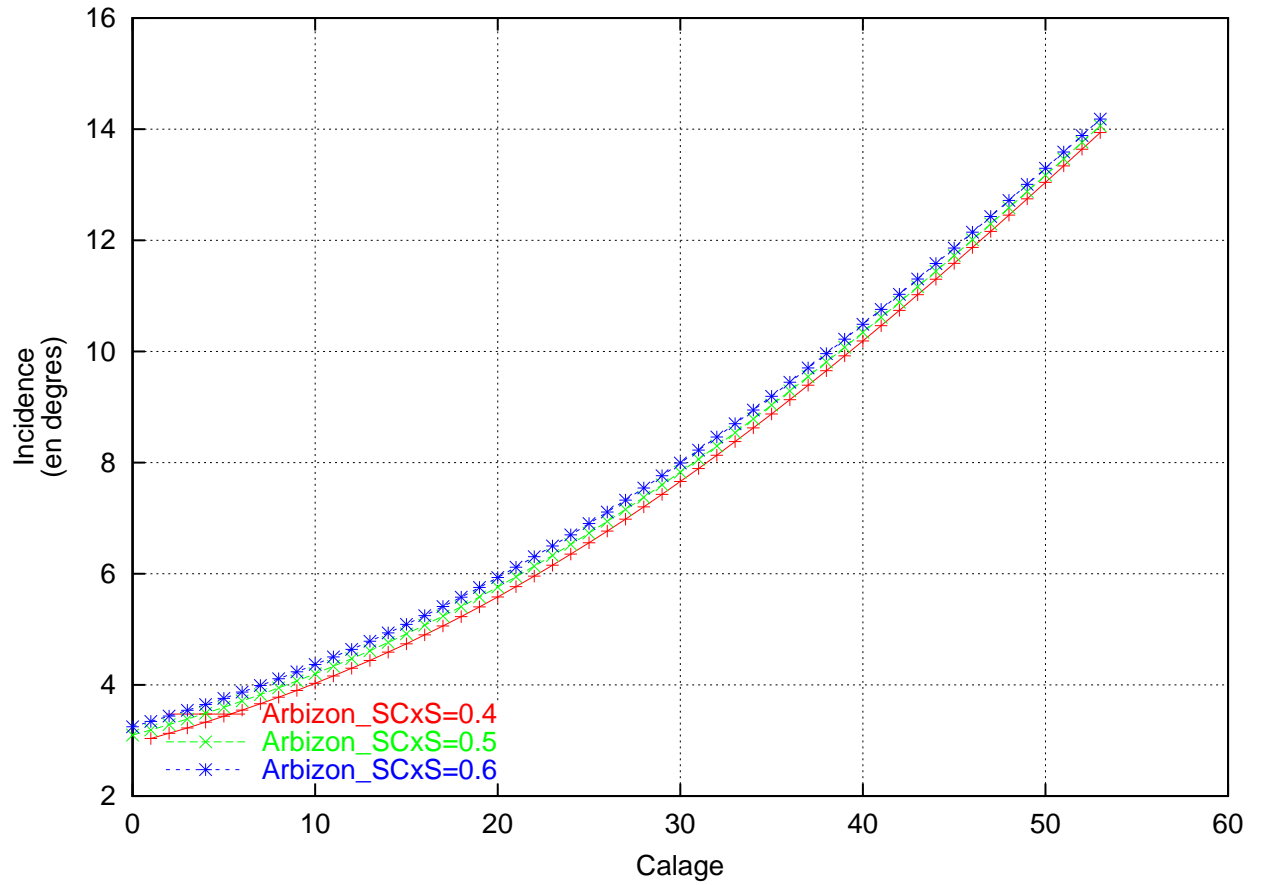


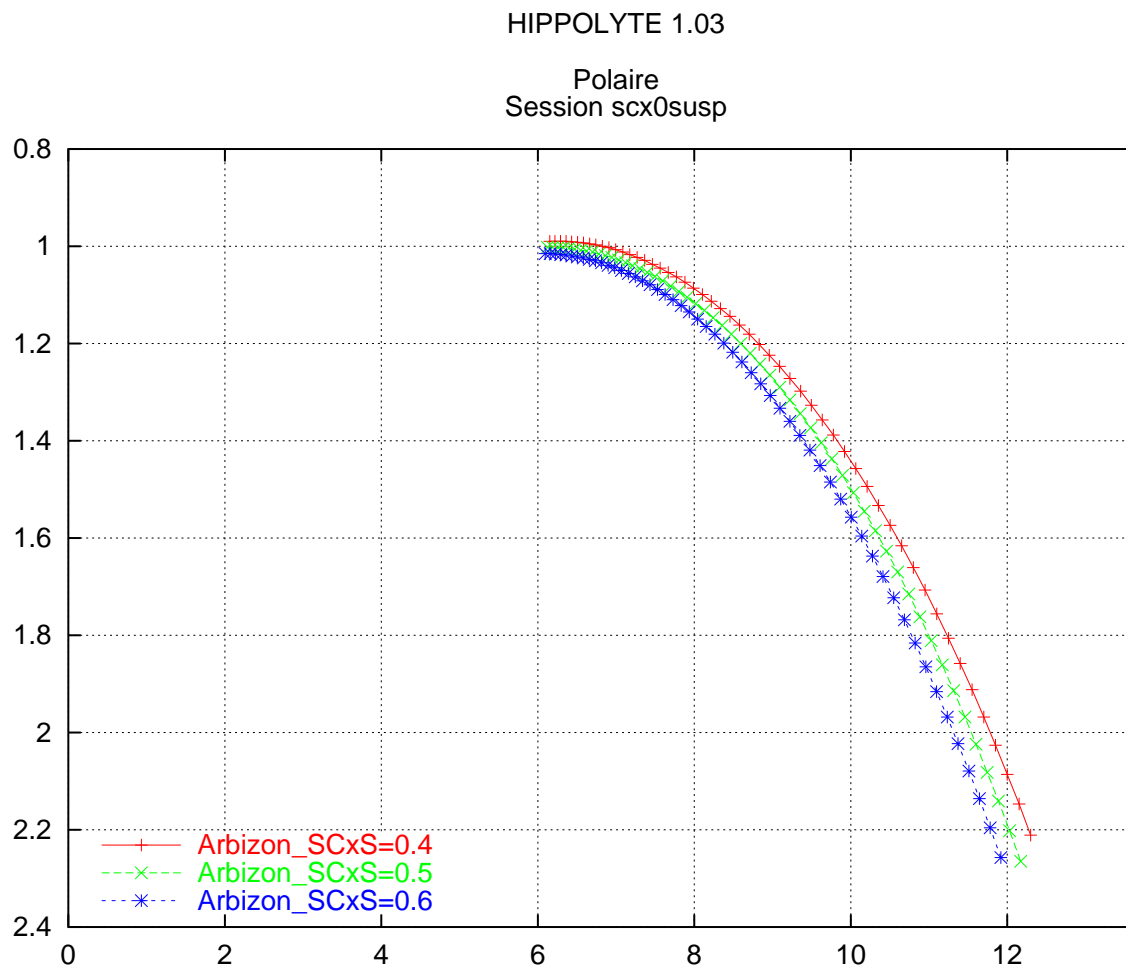


2.11 Influence du SCx0 des suspentes

HIPPOLYTE 1.03

Incidence
Session scx0susp

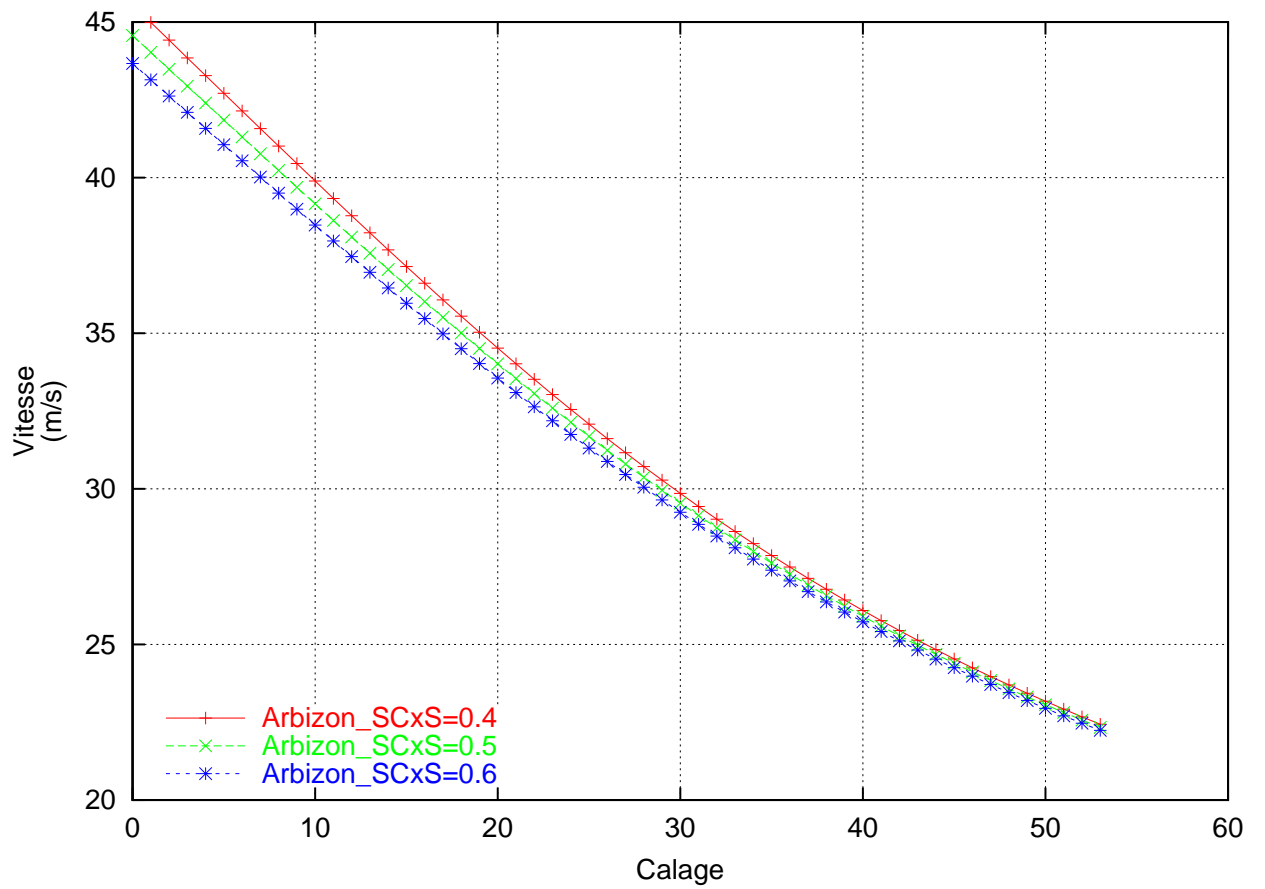


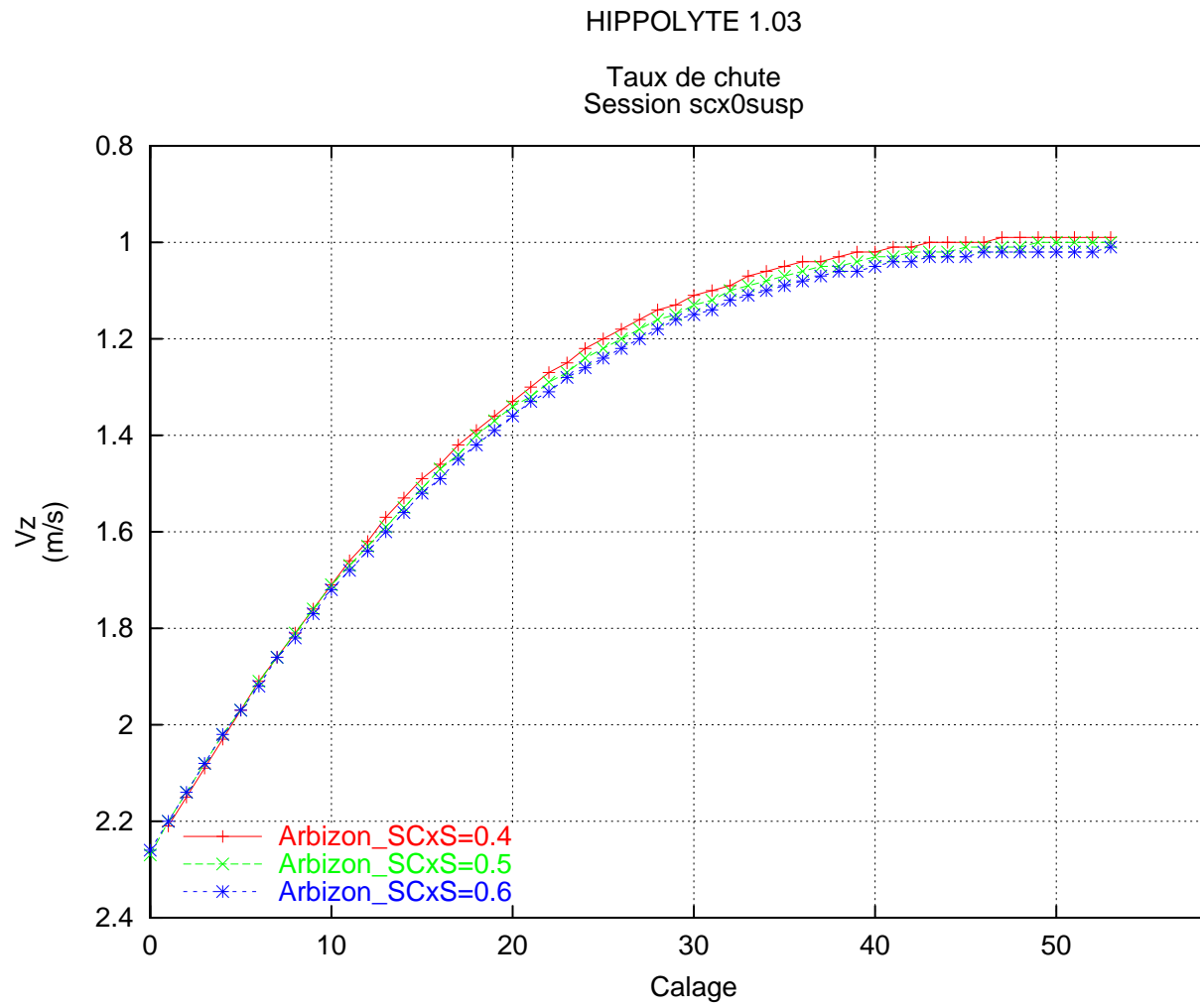


2.11 Influence du SCx0 des suspentes

HIPPOLYTE 1.03

Vitesse
(m/s)
Session scx0susp

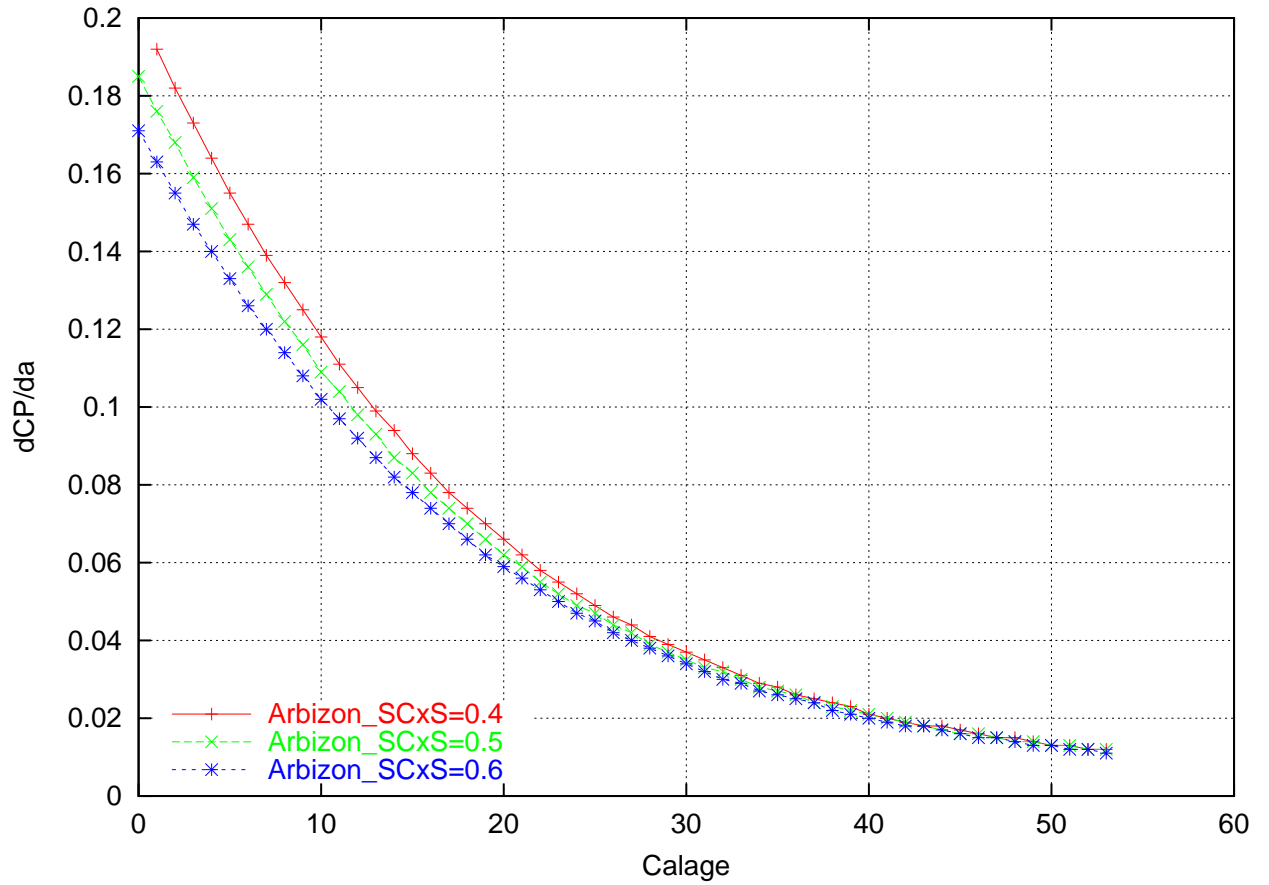




2.11 Influence du SCx0 des suspentes

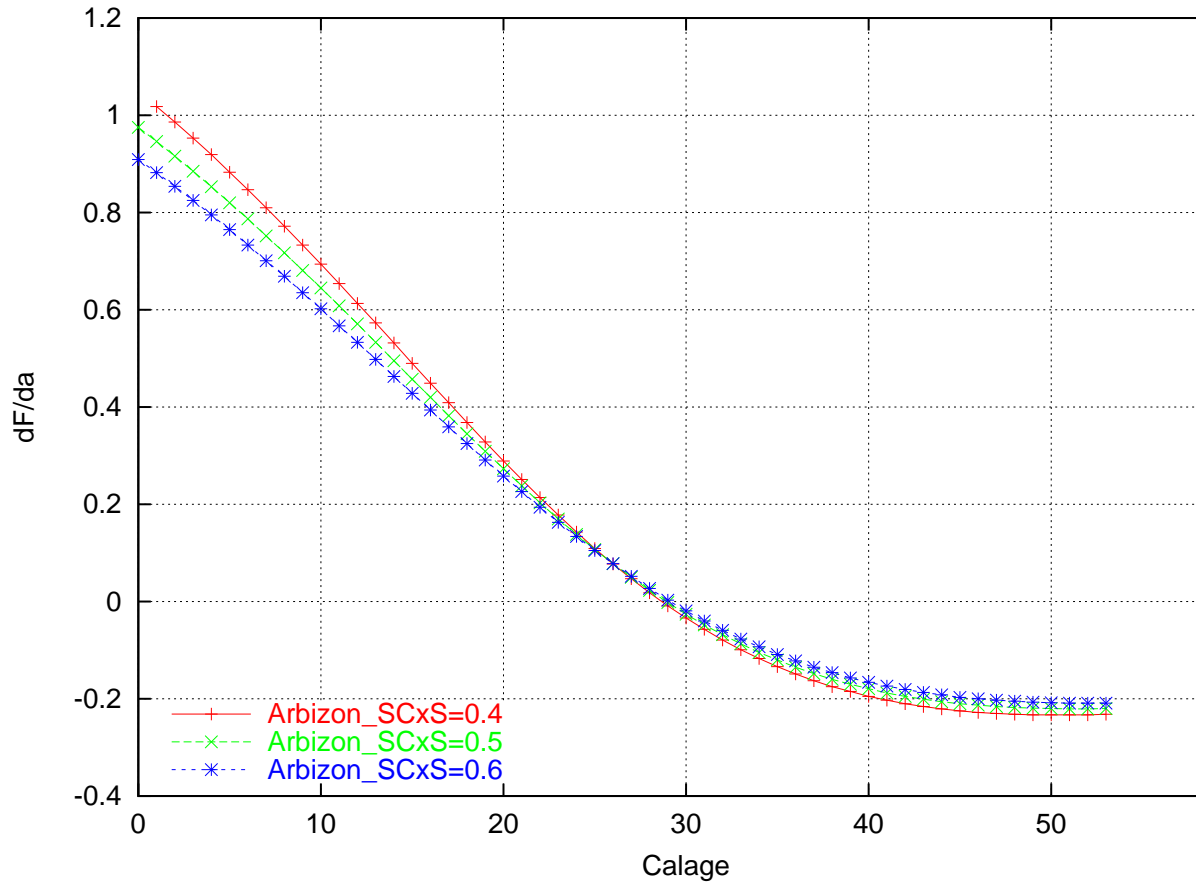
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session scx0susp



HIPPOLYTE 1.03

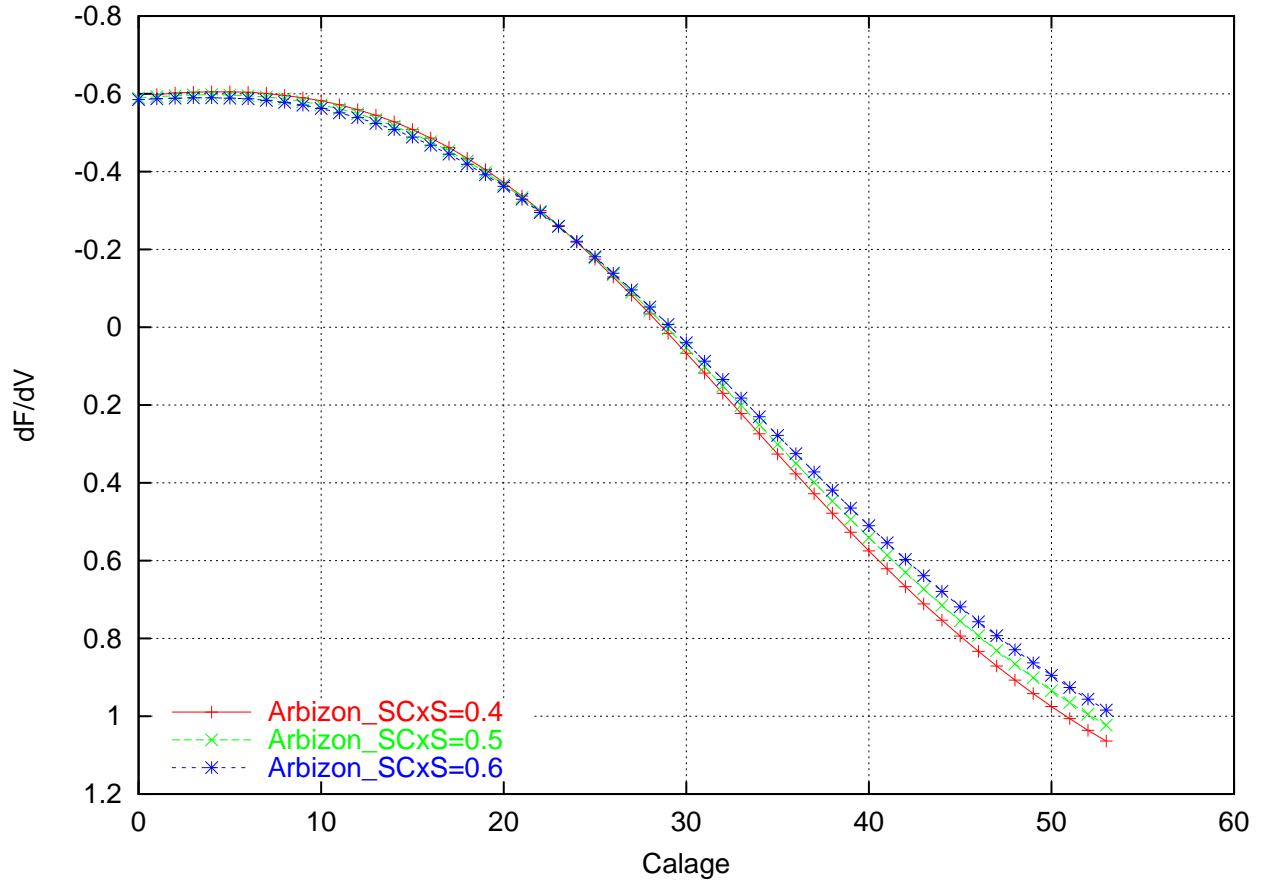
Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session scx0susp

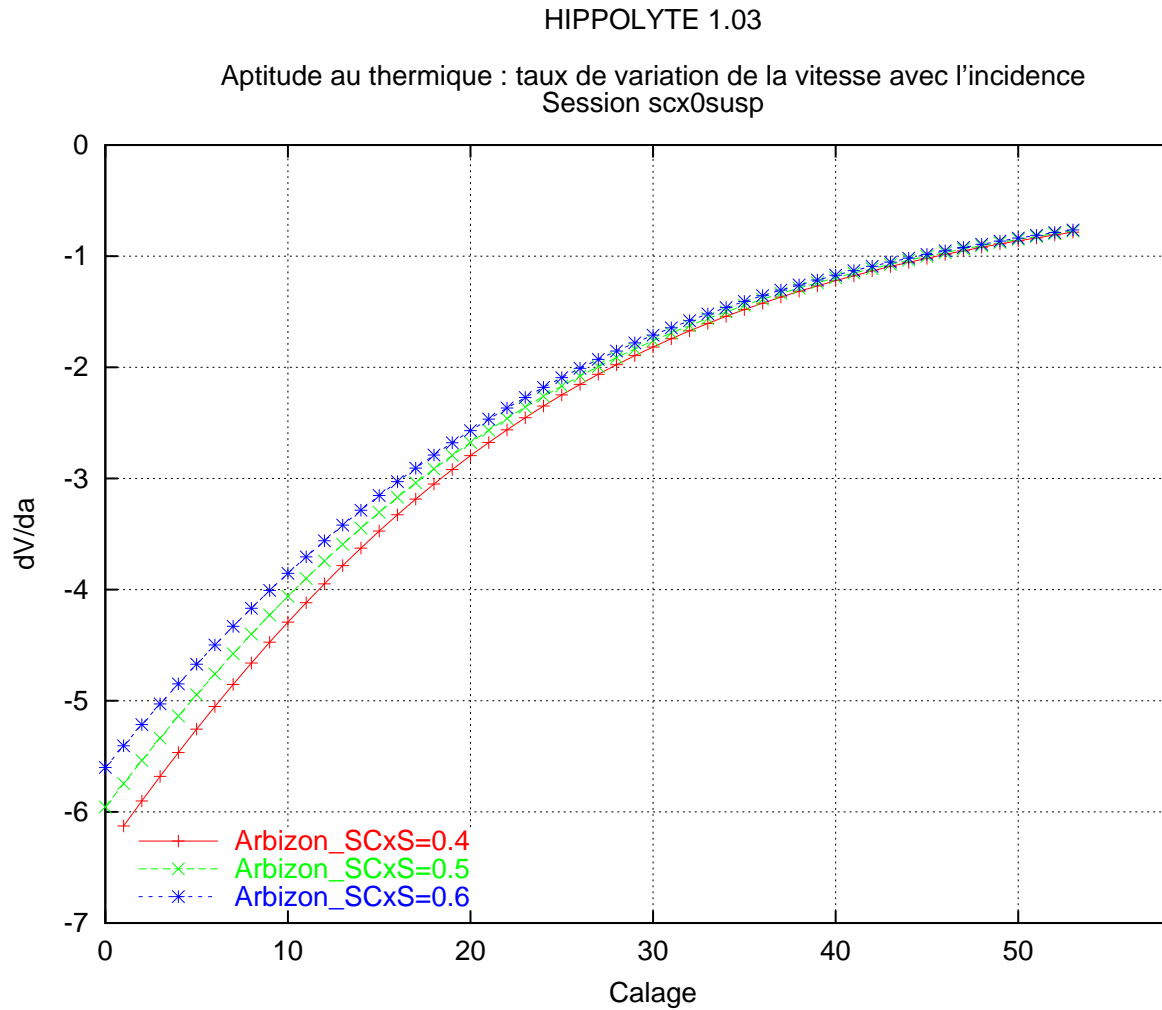


2.11 Influence du SCx0 des suspentes

HIPPOLYTE 1.03

Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session scx0susp





2.12 Réduction simultanée des différentes sources de traînée

Le fichier de données est le suivant :

```

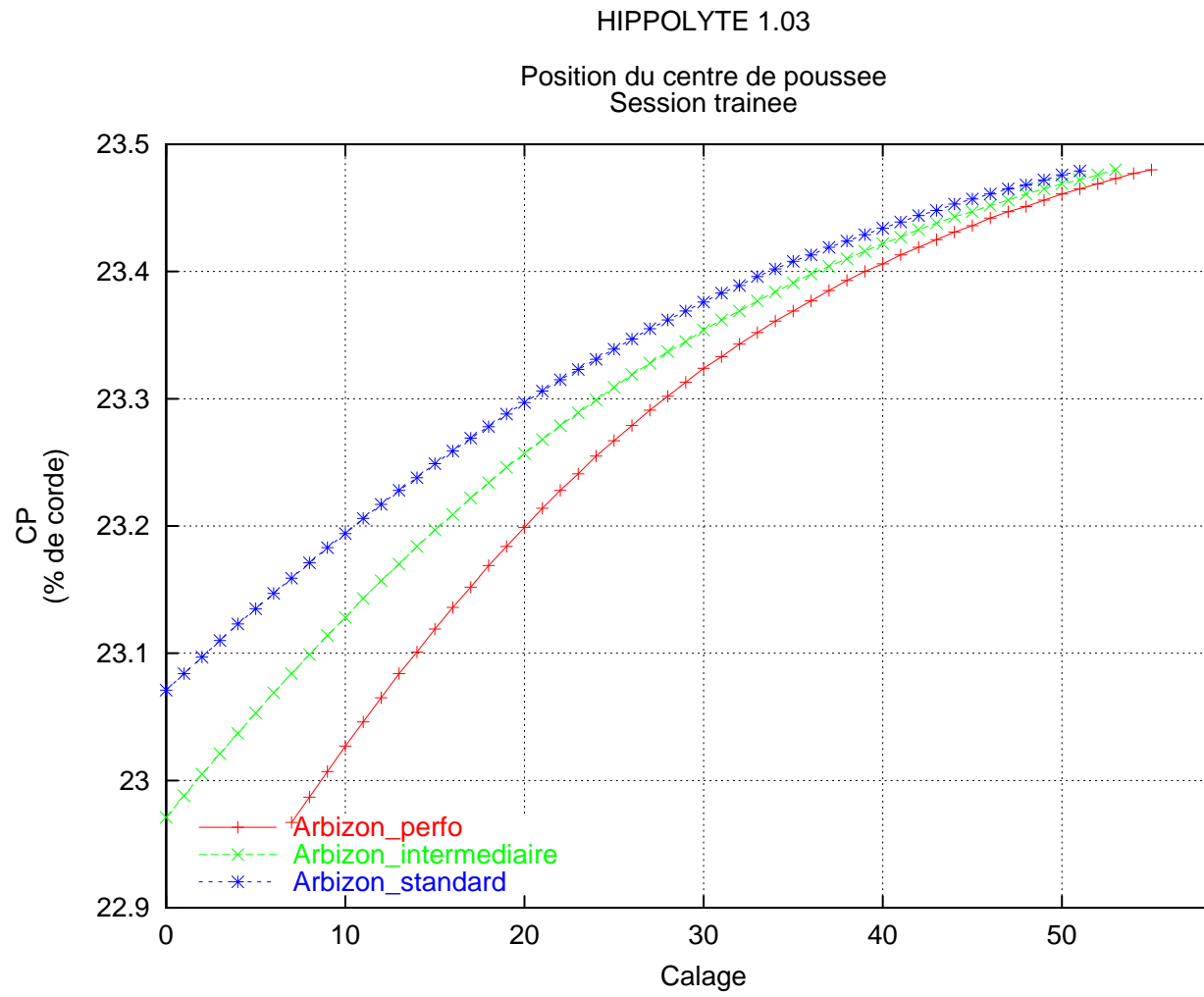
NOMBRE DE CONFIG          3

#je fais varier le sCx0 de l'aile de 0.02 à 0.04
#le sCx0 du pilote de 0.14 à 0.53
#le sCx0 des suspentes de 0.4 à 0.6
CONFIG1
  FICHER D'ENTREE          arbizon.lis
  SCX DU PILOTE            0.14
  SCX DU SUSPENTAGE        0.4

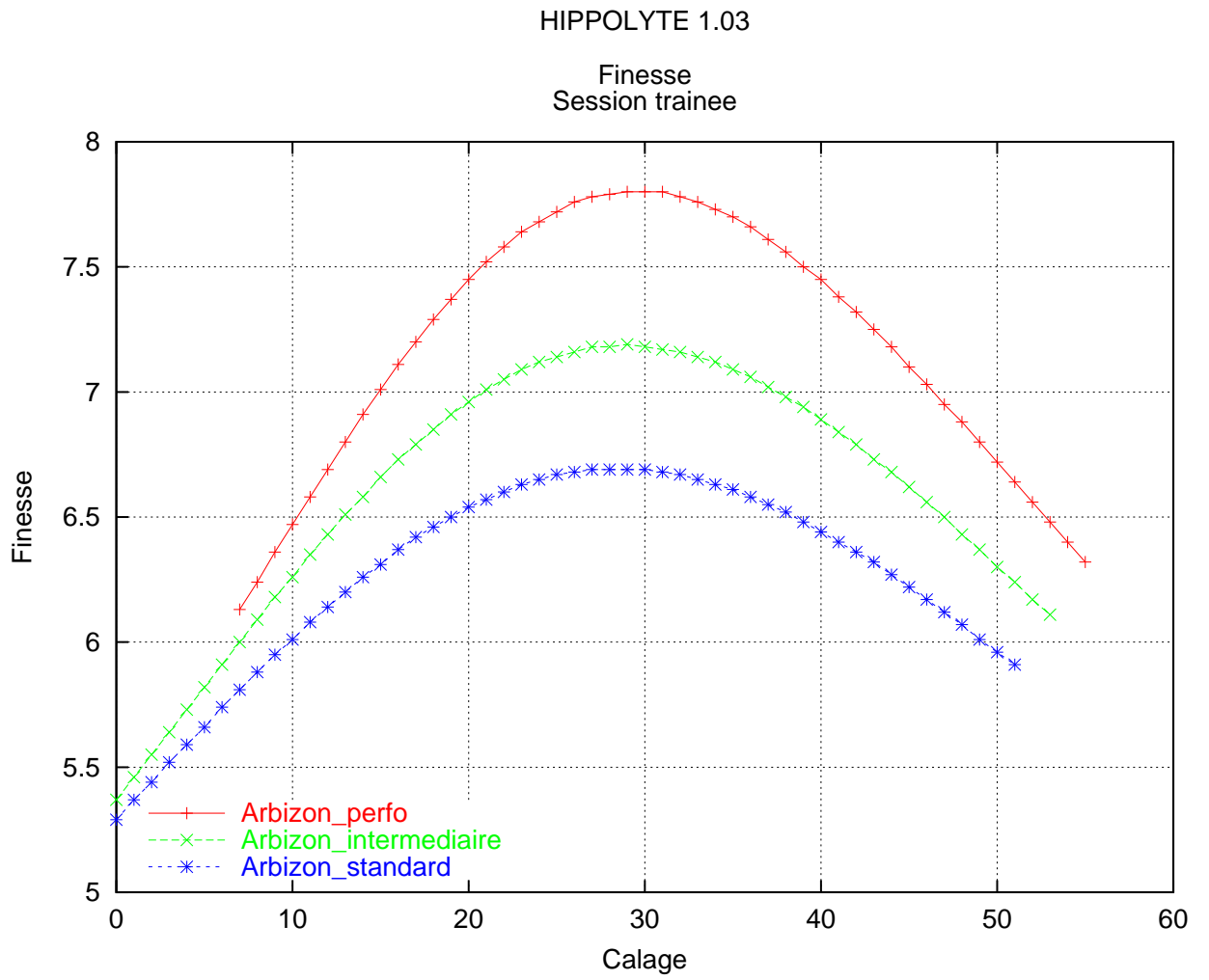
```

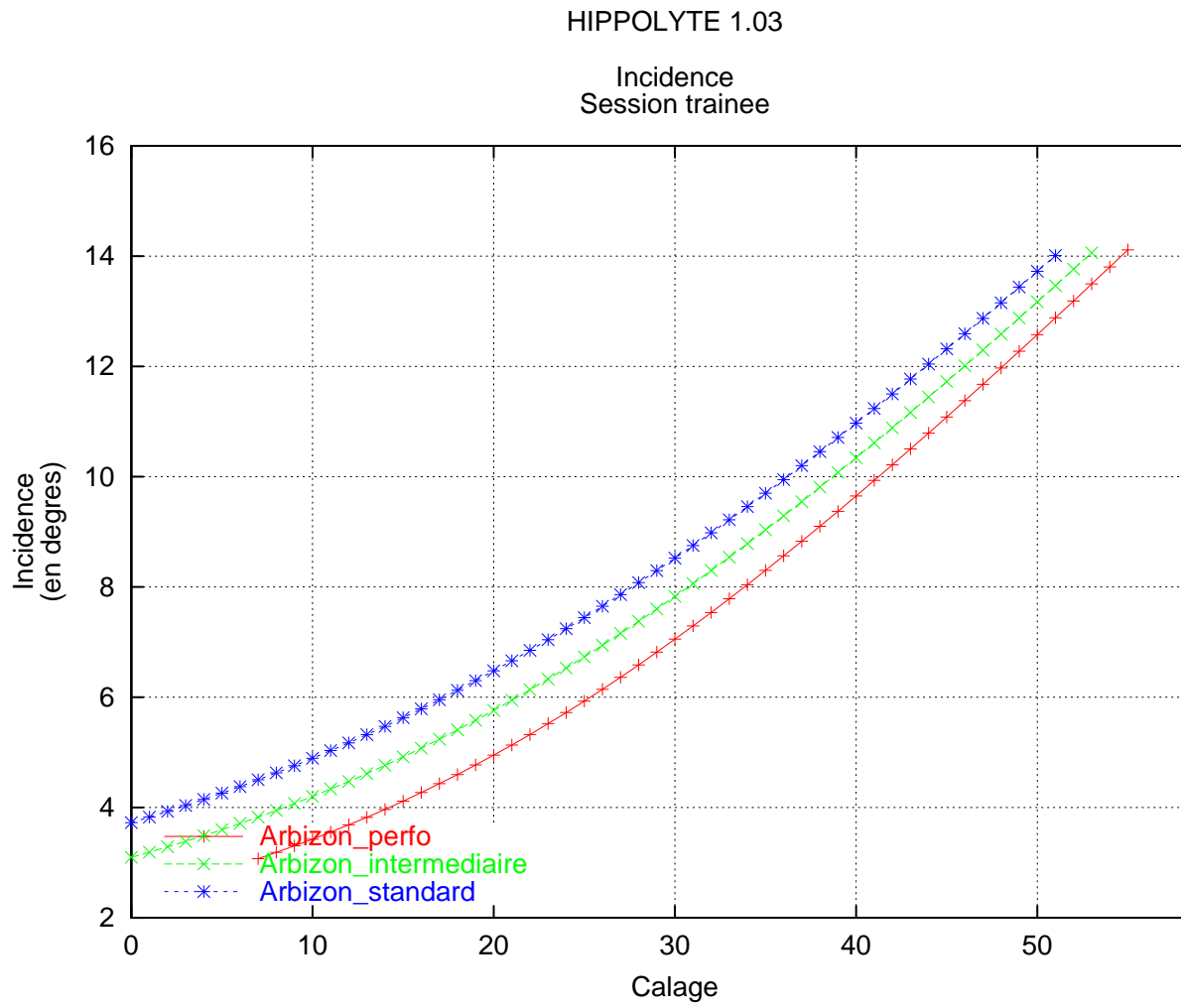
2.12 Réduction simultanée des différentes sources de traînée

```
VOILE
  NOM DE LA VOILE      Arbizon_perfo
  CXOA                  0.02
CONFIG2
  FICHER D'ENTREE      arbizon.lis
  SCX DU PILOTE        0.3
  SCX DU SUSPENTAGE    0.5
VOILE
  NOM DE LA VOILE      Arbizon_intermediaire
  CXOA                  0.03
CONFIG3
  FICHER D'ENTREE      arbizon.lis
  SCX DU PILOTE        0.53
  SCX DU SUSPENTAGE    0.6
VOILE
  NOM DE LA VOILE      Arbizon_standard
  CXOA                  0.04
END
```



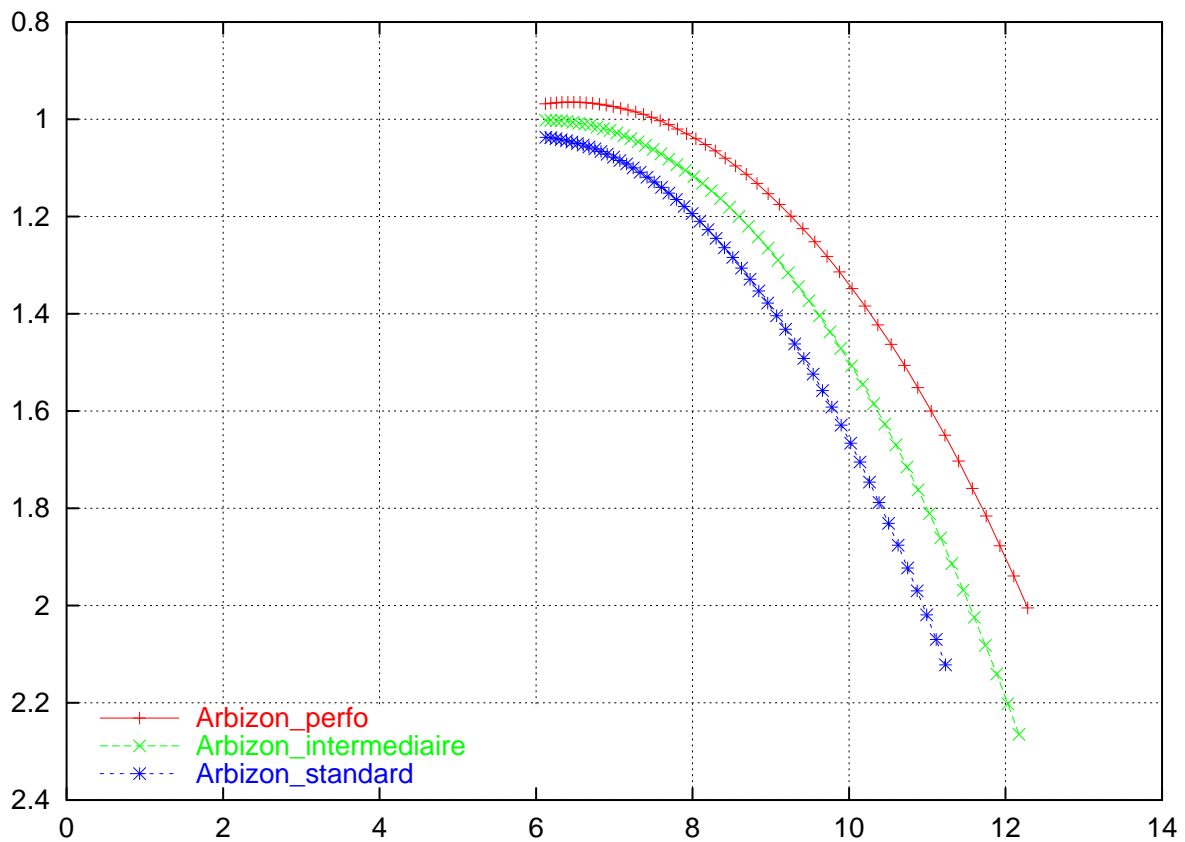
2.12 Réduction simultanée des différentes sources de traînée

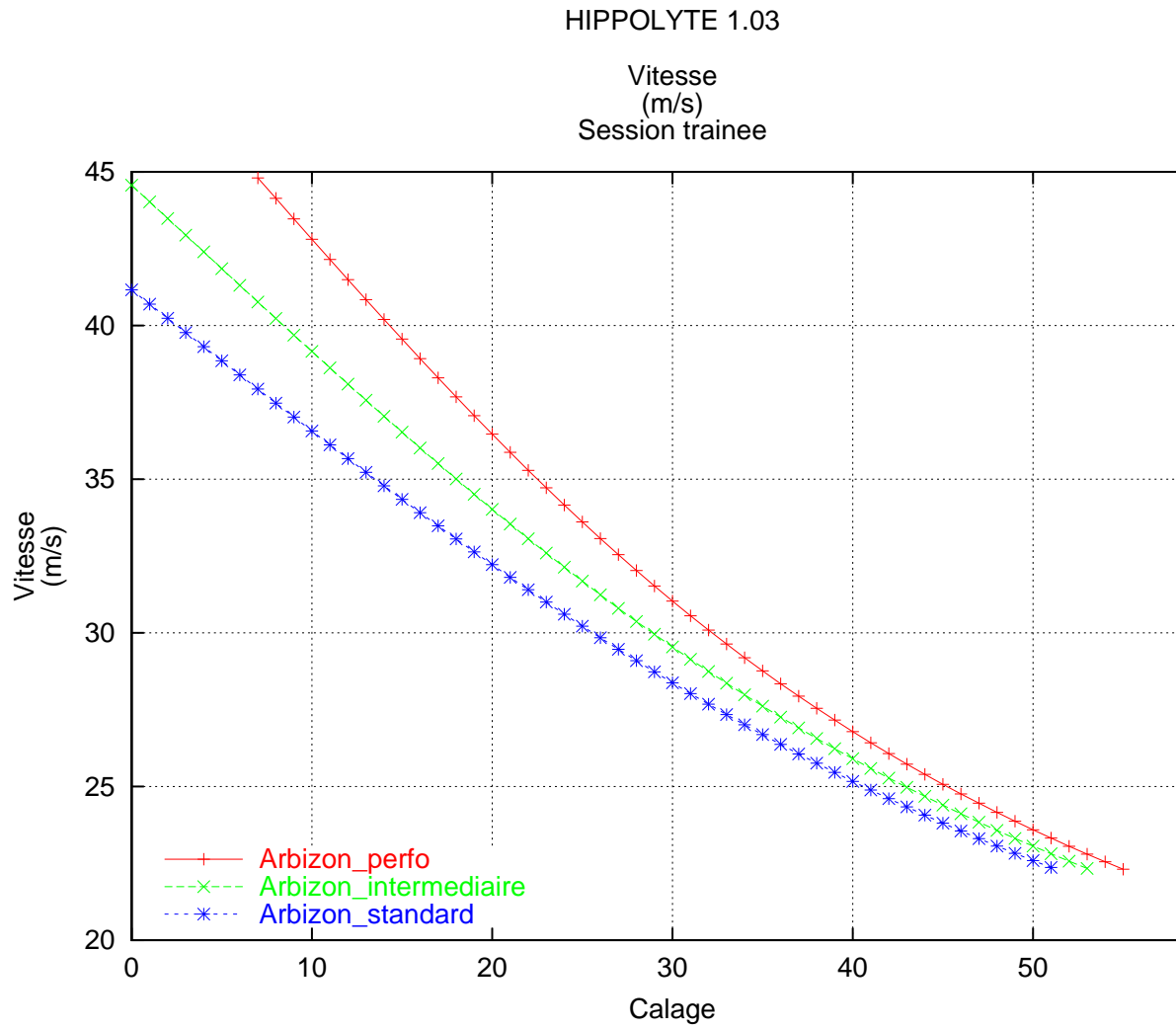




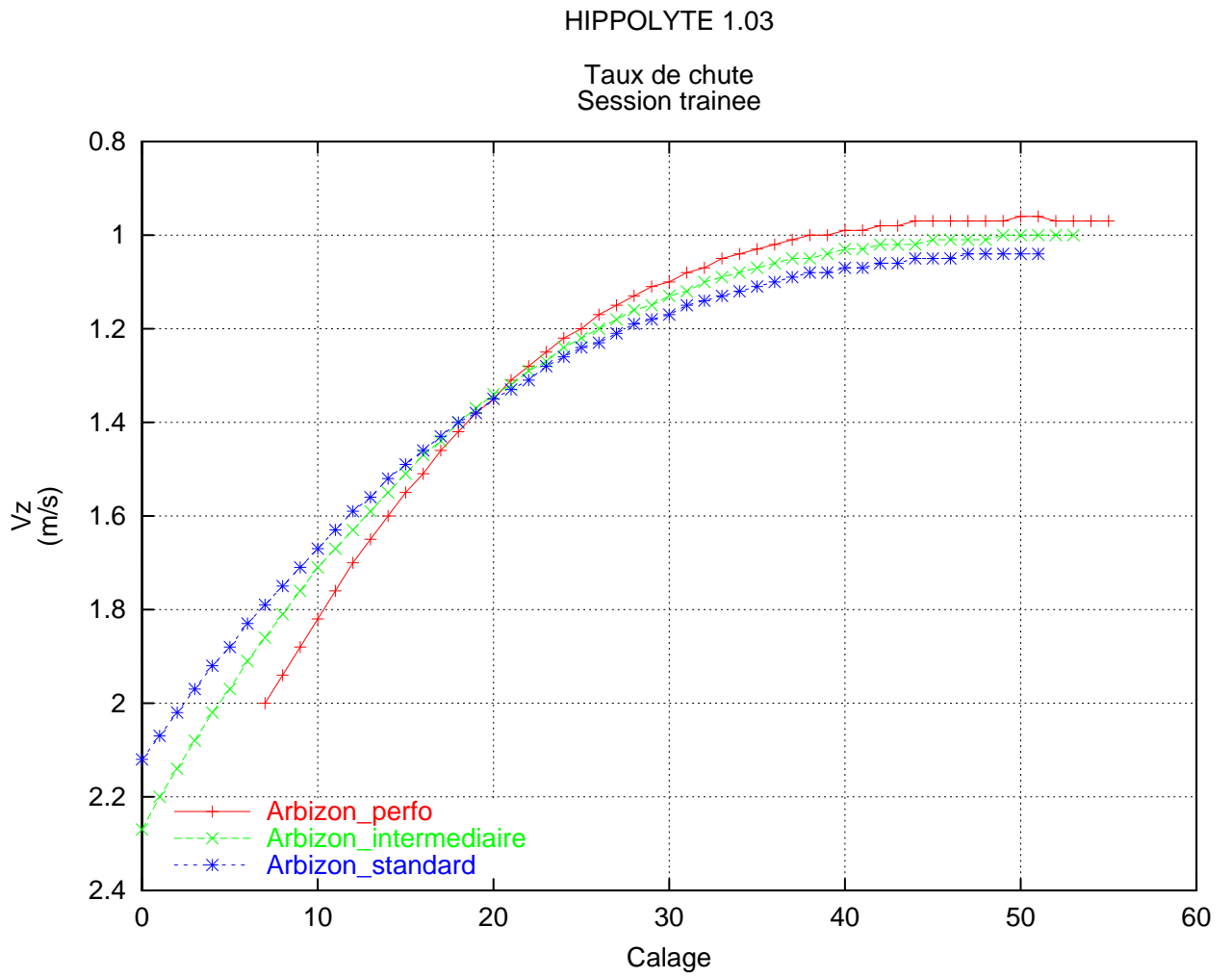
HIPPOLYTE 1.03

Polaire
Session trainee



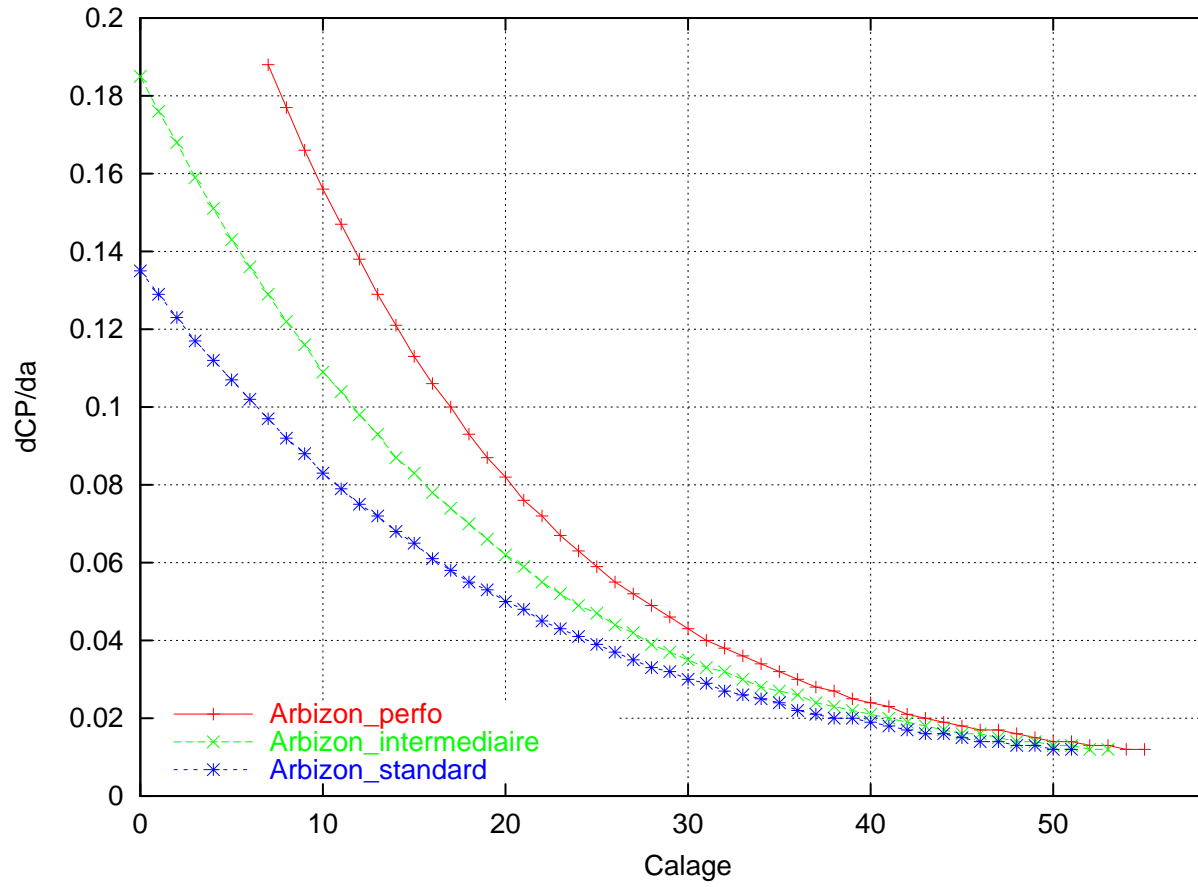


2.12 Réduction simultanée des différentes sources de traînée



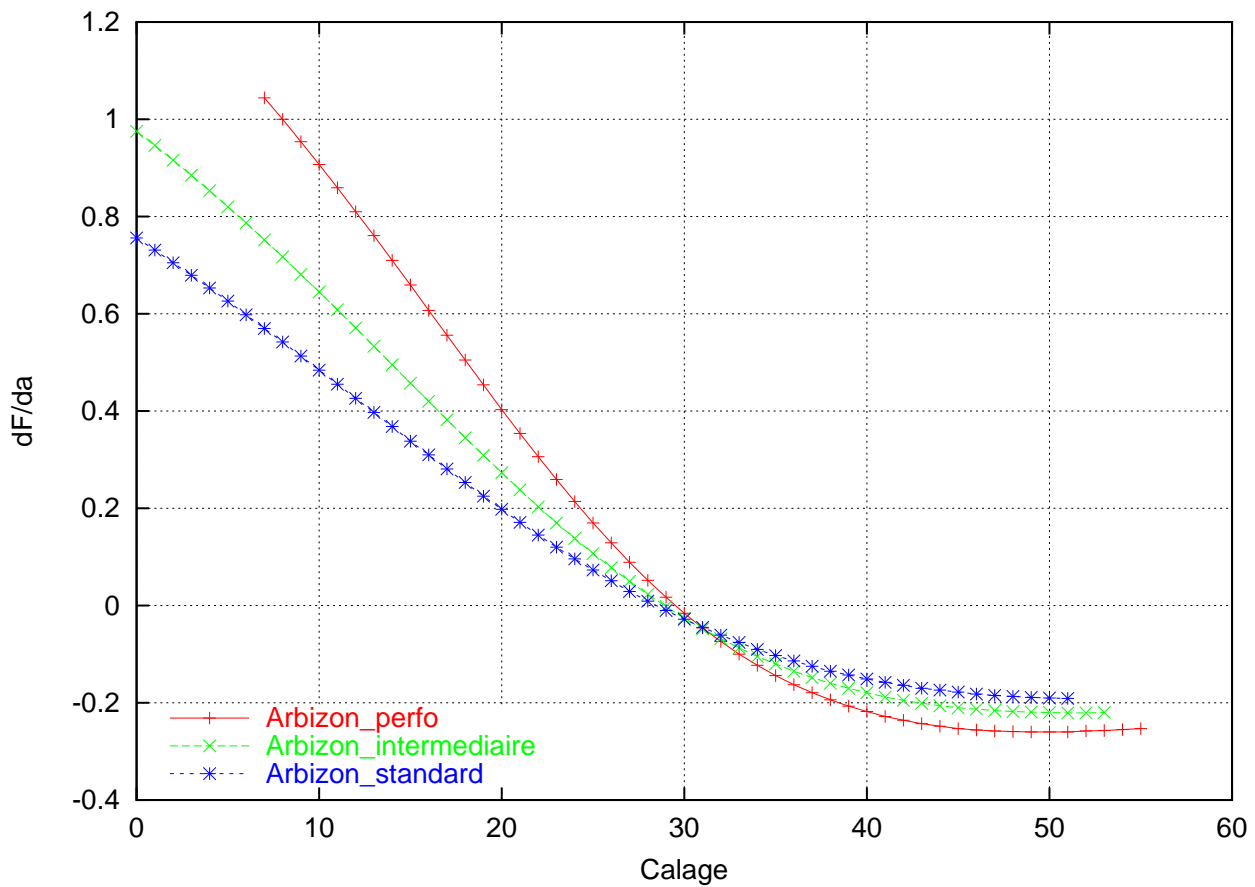
HIPPOLYTE 1.03

Stabilité tangage : taux de variation du centre de poussée avec l'incidence
Session trainée



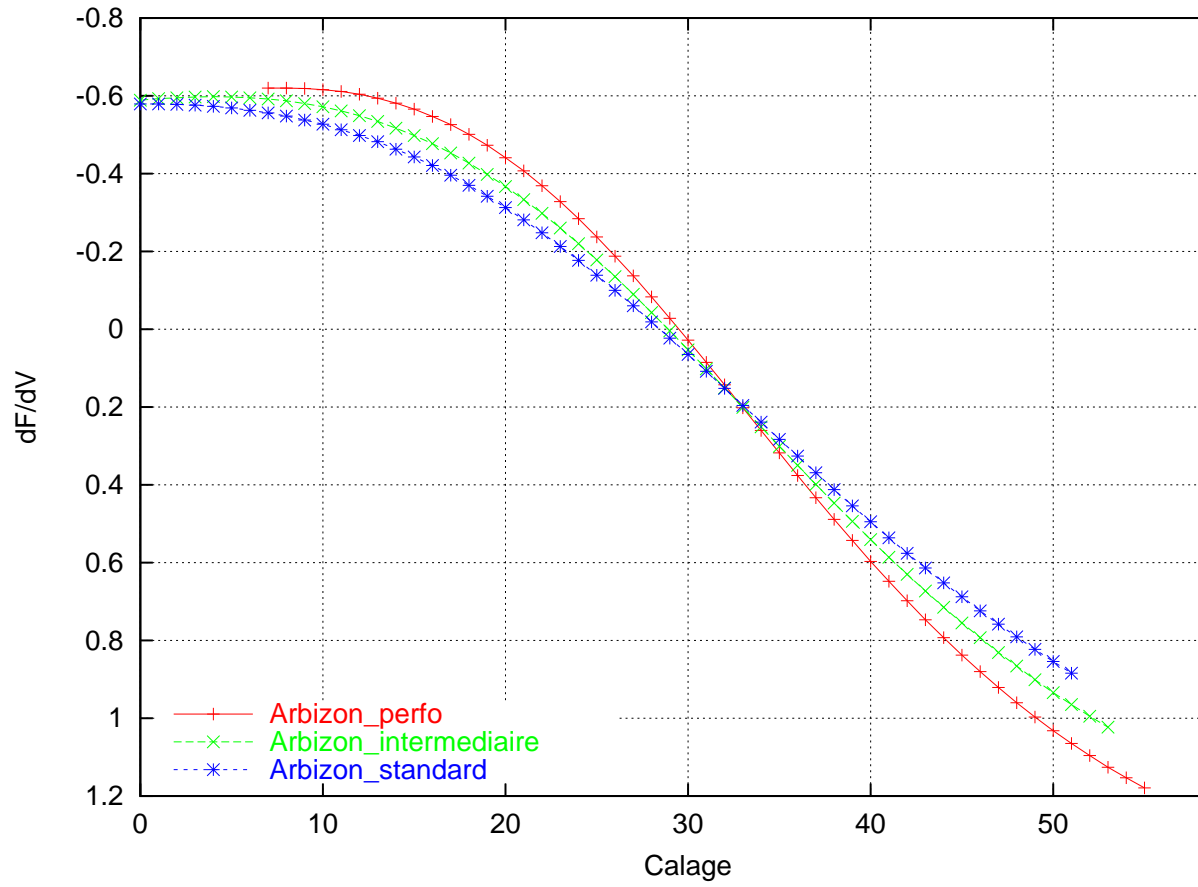
HIPPOLYTE 1.03

Taux de variation de la finesse avec l'incidence
Session trainée



HIPPOLYTE 1.03

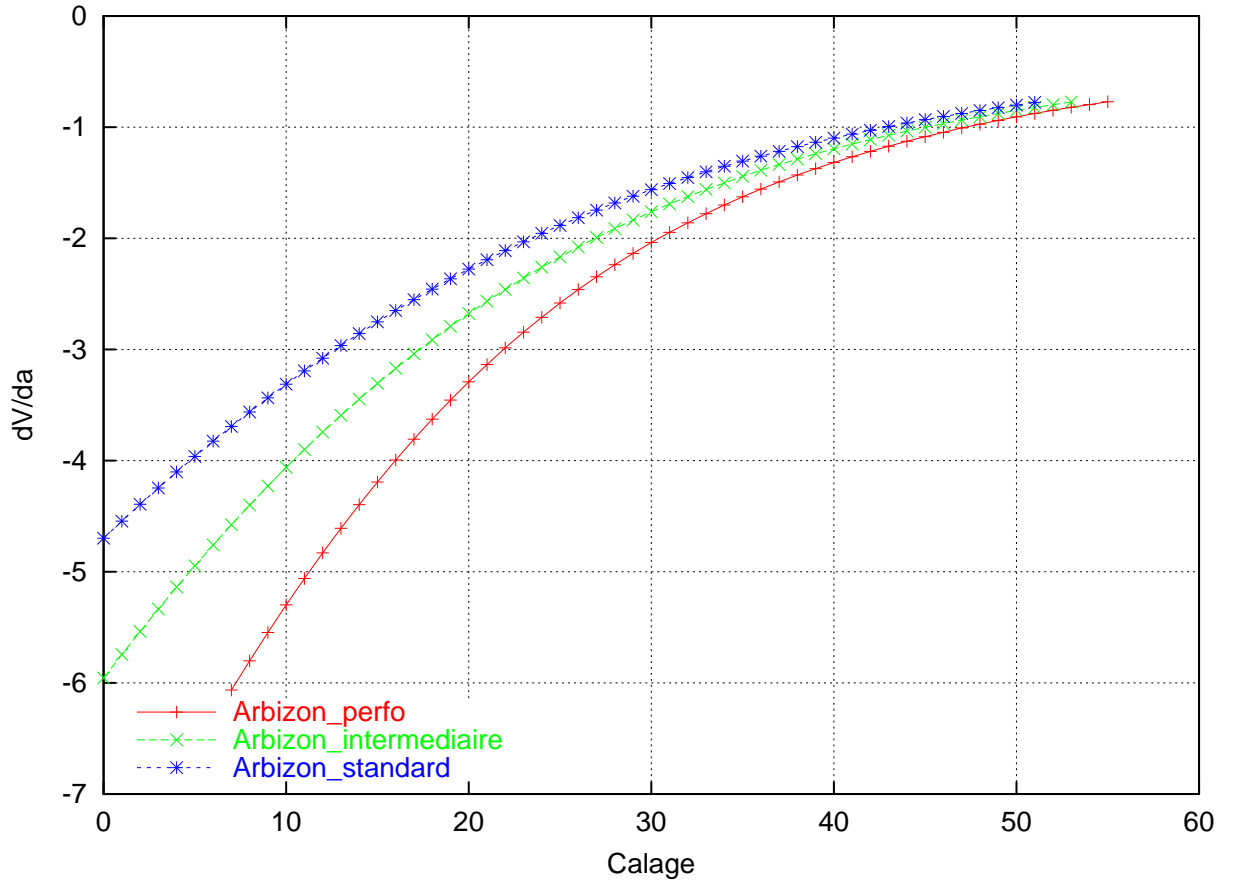
Performance de l'accélérateur : taux de variation de la finesse avec la vitesse
Session trainée



2.12 Réduction simultanée des différentes sources de traînée

HIPPOLYTE 1.03

Aptitude au thermique : taux de variation de la vitesse avec l'incidence
Session trainee



2 *Résultats*

Contents

1	Le logiciel Hippolyte, utilisation	5
1.1	Motivation et environnement	5
1.2	Paramètres et résultats des simulations	5
1.2.1	Paramètres de la session, valeurs par défaut	6
1.3	Les descripteurs de comportement proposés	7
1.3.1	Descripteurs liés à la vitesse V	8
1.3.2	Descripteurs liés à l'incidence α	11
1.3.3	Descripteurs liés au centre de poussée CP	11
1.3.4	Descripteurs liés à la finesse f	11
1.3.5	Descripteurs liés au taux de chute V_z	12
2	Résultats	13
2.1	Influence du profil sur le comportement d'un parapente	13
2.1.1	Profils de la famille NACA 24XX	13
2.1.2	Profils de la famille NACA 2X15	23
2.2	Influence de la forme en plan (point d'insertion)	34
2.3	Influence du profil dans la famille Nervures	45
2.4	Influence de la longueur du suspentage	56
2.4.1	Profil à centrage avant : Kenya	56
2.4.2	Profil à centrage arrière : Ibis	66
2.5	Influence de l'allongement	76
2.6	Influence de la masse du pilote	86
2.7	Influence de la charge alaire	96
2.8	Influence de la masse de la voile	96
2.9	Influence du SCx pilote	106
2.10	Influence du SCx0 de la voile	116
2.10.1	Profil à centrage avant	116
2.10.2	profil à centrage arrière	126
2.11	Influence du SCx0 des suspentes	136
2.12	Réduction simultanée des différentes sources de traînée	146

Contents

Bibliography

- [Belloc] Hervé Belloc, Etude expérimentale, en soufflerie, de la traînée du pilote de parapente. ENSICA, juin 99.
- [Stroustrup] B.STROUSTRUP, Le Langage C++, 2ième édition, ed. Addison-Wesley, 1992.
- [McCormick] B.W.McCORMICK, Aerodynamics, Aeronautics & FlightMechanics, ed. John Wiley & Sons, 1979.
- [BorlandUserGuide] BORLAND C++ 3.0, Guide de l'Utilisateur, 1991.
- [BorlandRef] BORLAND C++ 3.0, Guide de référence, 1991.
- [BorlandPro] BORLAND C++ 3.0, Guide du Programmeur, 1991.
- [BorlandUtil] BORLAND C++ 3.0, Outils et Utilitaires, 1991.
- [LaBurthe] C.La BURTHE et S.WALDEN, Etude de Sécurité surdes planeurs Ultra-Légers de Formule Rogallo. Aérodynamique etMécanique de Vol. Note Technique 1979-8 de l'ONERA.
- [Nougier] J.P.NOUGIER, Méthodes de Calcul Numérique, ed.Masson, 3ième édition, 1987.
- [Moran] J.MORAN, Introduction to Theorical and PracticalAerodynamics, ed. J.Wiley & Sons, 1984.
- [Norton] P.NORTON, P.Yao, Borland C++, Programmation Windows, Le-Livre Officiel Borland, ed. Sybex, 1992.
- [Comolet] R.COMOLET, Mécanique Expérimentale des Fluides,Tomme II 3ième édition, ed Masson, 1982.
- [Abbot] I.H.ABBOT et A.E.VON DOENHOFF, Theory of Wings Sections,Dover Publications, New York, 1958.
- [Bertin] John BERTIN, M.L.SMITH, Aerodynamics for Engineers, ed.Prentice-Hall, 1979, 1989.
- [Durand] Aerodynamic Theory : a General Review of Progress, Vol 4,Ed. W.F. Durand, Gloucester, Mass, 1976.

Bibliography

- [Ashley] Holt ASHLEY, Marten LANDAHL, Aerodynamics of Wings and Bodies, ed. Dover Publications, 1965.
- [Glauert] H.GLAUERT, The elements of Aerofoil and Airscrew Theory, 2nd edition, ed. Cambridge University Press, 1926, 1947.
- [Bonnet] A.BONNET, J.LUNEAU, Théories de la Dynamique des Fluides, CEPADUES Editions, 1989.
- [Brebbia] C.A.BREBBIA, J.DOMINGUEZ, Boundary Elements, an Introduction Course, ed. Computational Mechanics Publications & McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [Ghali] A. GHALI, A. M. NEVILLE, Structural Analysis, a Unified Classical and Matrix Approach, ed. Intext Educationnal Publishers, ISBN0-7002-2346-0
- [Katz] J. KATZ, A. POTKIN, Low-Speed Aerodynamics, From Wing Theory to Panel Methods, ed. McGraw-Hill, Inc., 1991. ISBN 0-07-100876-4.
- [Hoeijmakers] H.W.M. HOEIJMAKERS, Panel Methods for Aerodynamic Analysis and Design, in AGARD Report 783 (Special course on Engineering Methods in Aerodynamic Analysis and Design of Aircraft), janvier 1992.
- [Tomek] http://www.mpa-garching.mpg.de/~tomek/CFD/CFD_books.html
- [Plewa] http://www.astrouw.edu.pl/plewa/CFD/CFD_books.html
- [Aupetit] Hubert AUPETIT, Traité de pilotage et de mécanique du vol, Ed. Rétime, 1990.
- [Puisseux] Pierre PUISEUX, La simulation numérique comme outil de conception des parapentes, a paraitre, 1997.
- [Boyer] Marc BOYER, Kenya, le retour aux sources, Vol Libre 246, Janvier 97.