

MODELISATION DES PERFORMANCES EN CYCLISME

P.Dupuis¹

1. Unité Informatique Appliquée au Sport - Département Recherche INSEP. Paris. France

La modélisation mathématique de la performance en sport peut mettre en lumière l'interaction entre les différents systèmes physiologiques ou mécaniques mis en jeu.

Une étude des facteurs de la performance en cyclisme a été menée et a abouti au développement d'un programme informatique : *Predivel*. Ce programme permet de vérifier le pouvoir de prédiction des modèles adoptés en les confrontant à des performances réelles en compétition sur piste ou sur route. Ce travail illustre un rôle que peut jouer l'informatique appliquée au sport: "une science qui permet de théoriser des pratiques et de mettre en pratique des théories".

L'approche adoptée utilise deux expressions indépendantes de l'énergétique en cyclisme. L'une est une expression du besoin d'énergie mécanique, dérivée des principes biomécaniques utilisant des équations du mouvement en cyclisme (Di Prampero et col, 1979; Whitt et Wilson, 1975; Olds, 1995). L'autre est une expression de la quantité d'énergie dont dispose le coureur cycliste pour soutenir un effort : notion d'index d'endurance (Péronnet et Thibault, 1989; Léger et col, 1984). Les modèles généraux, proposés par ces auteurs, ont été modifiés par l'apport de facteurs de correction ajustés au fil de l'étude.

Méthode

La modélisation adoptée

Paramètres utilisés dans le modèle

A l'aide du logiciel, des performances sont prédites lors d'épreuves officielles contre la montre en utilisant un ensemble de paramètres disponibles mesurables (valeurs physiologiques, morphologiques, environnement), ou pouvant être déduits de travaux antérieurs, ou encore d'hypothèses empiriques. Le logiciel calcule alors d'autres paramètres en combinant plusieurs équations.

Variables et équations utilisées:

Paramètres individuels:

<i>Symbole</i>	Unité	Description
<i>VO₂ max</i>	ml/kg/min	Volume maximal d'oxygène
<i>PMA</i>	watt	Puissance maximale aérobie
<i>Pc</i>	kg	Masse du coureur
<i>Pv</i>	kg	Masse du vélo + vêtements et accessoires
<i>Taille</i>	cm	Taille du coureur
<i>R</i>		Rendement mécanique global en % (19 à 28% en général)
<i>S</i>	m ²	Surface corporelle en fonction du poids et de la taille (équation de Dubois) $S = Taille^{(0,725)} \cdot Pc^{(0,425)} \cdot 0,007184$
<i>SA</i>	m ²	Surface totale opposée à l'air en fonction de la surface <i>S</i> et de la position du coureur (pourcentage de la surface <i>S</i>)
<i>Power</i>	watt	Puissance mécanique disponible à partir du VO ₂ en fonction du poids et du rendement mécanique. $Power = (VO_2 * R * Poids) / 2.84$
<i>Cx</i>		Coefficient de résistance de l'air en fonction de la position du coureur $0,5 \leq Cx \leq 0,9$

Index Index d'endurance du coureur
 $-5 \leq \text{Index} \leq -20$
 Permet de calculer un temps pour une intensité en % de VO2 donnée ou une intensité critique pour un temps d'effort donné.
 $\text{Index} = \text{Log}(100 - \text{Pct}) / (\text{Log}(7) - \text{Log}(\text{Tps}))$
Pct = % de VO₂ soutenue
Tps = temps en minutes de l'effort

Paramètres d'environnement

Torr mmHg Pression atmosphérique en mm de mercure
Temp ° Celsius Température de l'air
r Kg/m³ Densité de l'air en fonction de la température, de la pression atmosphérique et de l'altitude:
 $r = 1,27 \cdot (\text{Torr} / 760) \cdot (273,15 / (273,15 + \text{Temp}))$
A m Altitude
G Pesanteur en fonction de l'altitude A
 $G = 9,80665 \cdot (6378 / (6378 + A / 1000))^2$
Pente Pente du terrain en fraction
 $0,01 = \text{pente de } 1\%, \text{ montée de } 1 \text{ m pour une distance de } 100 \text{ m}$
C_{fs} Coefficient de frottement au sol. Dépend du type de surface du sol et des pneus, du diamètre de la roue.
 $0,001 < C_{fs} < 0,006$
C_{rr} Coefficient de résistance due à la rotation des roues
 $C_{rr} \gg 0,0027$

Paramètres calculés

V_s m/s Vitesse de déplacement par rapport au sol
V_v m/s Vitesse du vent favorable ou défavorable. Pondéré par rapport à son orientation.
V_a m/s Vitesse de déplacement par rapport à l'air
 $V_a = V_s + V_v$
R_a newton Résistance de l'air en fonction de la densité *r*, de la surface exposée à l'air SA et de la vitesse de déplacement par rapport à l'air au carré.
 $R_a = 1/2 \cdot r \cdot C_x \cdot SA \cdot V_a^2$
R_{fs} newton Résistance due au frottement des roues au sol (intervention de la pente du terrain)
 $R_{fs} = C_{fs} \cdot (P_c + P_v) \cdot G \cdot \text{Cos}(\text{Arctg}(\text{Pente})) \cdot V_s^2$
R_{rr} newton Résistance due à la rotation des roues et frictions des pièces mécaniques
 $R_{rr} = C_{rr} \cdot V_a^2$
R_g Newton Résistance due à la gravité lors de montées (effet négatif) ou de descentes (effet positif) dépend de la pente du terrain et du poids total homme- machine
 $R_g = \text{Sin}(\text{Arctg}(\text{Pente})) \cdot (P_c + P_v) \cdot G$
R_T Newton Résistance totale à l'avancement
 $R_T = R_a + R_{fs} + R_{rr} + R_g$

Algorithme général

Le modèle général permet de calculer la force nécessaire R_T pour faire avancer l'ensemble homme-machine dans des conditions données et à une vitesse donnée V_s . La puissance mécanique nécessaire devient:

$$P_{meca} = R_T \cdot V_s.$$

Sur un parcours dont toutes les déclivités, et l'environnement (altitude, température, pression atmosphérique) sont connus, une intensité moyenne de VO_2max , que le coureur va pouvoir maintenir, est fixée arbitrairement. Cette intensité moyenne est traduite en puissance mécanique que le coureur va fournir (*Power*) en fonction d'un rendement mécanique global. Sur chaque portion du parcours la vitesse possible est recherchée par itération telle que:

$$Power = P_{meca}$$
$$\text{ou } Power = R_T \cdot V_s$$

Connaissant la vitesse et la distance d'une portion de parcours, son temps partiel peut être calculé. En réitérant sur toutes les portions étalonnées du parcours, un temps final est obtenu. Compte tenu d'un index d'endurance, qui exprime la relation entre une intensité et un temps limite soutenable, le temps final obtenu est comparé au temps limite compatible avec l'intensité moyenne choisie au départ. Si c'est le cas, ce temps est retenu comme le temps réalisable. Dans le cas contraire le calcul est réitéré avec une autre hypothèse d'intensité initiale (supérieure ou inférieure).

L'algorithme décrit ci-dessus est le modèle général adopté pour un parcours sur piste dans des conditions normales, au niveau de la mer notamment. Dans le cas d'un parcours sur route, des facteurs de correction doivent être apportés pour chaque portion du parcours (délimitée par un changement de pente dont le niveau de précision dépend de l'altimètre adopté pour son étalonnage).

Facteurs de correction apportés pour chaque portion du parcours

Correction de la pesanteur

L'altitude moyenne A est calculée et la pesanteur G corrigée. Les résistances R_g et R_r proportionnelles au poids homme-machine vont donc diminuer avec l'augmentation de l'altitude.

Correction de la VO2 en fonction de l'altitude

Le VO_2 max évolue en fonction de l'altitude (Di Prampero et col, 1979). L'analyse des études citées ont conduit à l'adoption d'un coefficient moyen de correction de la VO_2 max, C_{alt} tenant compte de la diminution du VO_2 max en fonction de l'altitude.

Correction de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude

La pression atmosphérique $Torr$ diminue avec l'augmentation de l'altitude A entraînant la diminution de la densité de l'air r et donc de la résistance de l'air à l'avancement R_a .

Correction de la surface exposée en fonction des changements de position dans les montées et descentes

La surface exposée à l'air, calculée initialement à partir d'un pourcentage de la surface corporelle, l'est pour une position optimale du coureur en position de recherche de vitesse sur un parcours plat. Le coureur modifiant sa position en fonction de la déclivité du parcours, modifie cette la surface exposée à l'air.

Par exemple pour un coureur de 70 kg et de 1,80 m la surface exposée sur le plat sera de 0,369 m² (19,6% de la surface corporelle S), de 0,425 m² (22%) dans le cas d'une pente à 5%.

Correction du coefficient de pénétration dans l'air en fonction des changements de position dans les montées et descentes

Les changements de position modifient la forme générale du coureur et donc le coefficient de pénétration dans l'air C_x (qui dépend de cette forme). Le coefficient moyen est corrigé en fonction de la *pente*.

Correction de l'intensité moyenne investie

L'observation d'enregistrements cardiaques de courses contre la montre, indique que les coureurs ne maintiennent pas une intensité stable tout au long du parcours. La fréquence cardiaque s'élève et diminue avec la déclivité du parcours. Le coureur investit une intensité supérieure en montée, pour tenter de maintenir une certaine vitesse et relâche légèrement son effort en descente.

Correction du rendement mécanique R

Cette correction illustre, à ce stade, l'hypothèse d'une variation du rendement mécanique moyen du coureur en fonction des déclivités du parcours, modifiant la technique de pédalage notamment en raison de facteurs techniques. L'ascension de montées importantes entraînent vraisemblablement un coût énergétique supérieur, en raison d'activités musculaires intervenant pour l'équilibration ou le tirage sur les bras par exemple.

Le programme informatique permet d'obtenir:

- un pourcentage moyen de VO_2 max utilisé,
- une puissance moyenne développée,
- un temps final,

et pour chaque portion du parcours:

- des temps de passages,
- des puissances partielles,
- des vitesses partielles,

Il permet également:

- de tracer le profil du parcours à partir des altitudes,
- de tracer un graphique des vitesses prédites,
- d'établir un tableau de marche avec les temps de passage à chaque km (par exemple) ou à des points de contrôle (distance) choisis.

Résultats obtenus

De nombreuses données d'épreuves contre la montre ont été recueillies lors de nombreuses compétitions de haut niveau international : Tour de France, Championnat du Monde, Championnat de France, Grand Prix des Nation, Paris-Nice, Dauphiné Les temps prédits ont été comparés avec les temps réels. Des résultats sont présentés à partir de 3 contre la montre du Tour de France 1996, assez homogènes avec ceux d'autres courses. Pour chaque course, un relevé topographique précis a été effectué à l'aide d'un altimètre afin de repérer les *pent*es. Les données physiologiques et morphologiques récentes pour 12 coureurs ont été recueillies auprès du laboratoire ayant effectué les tests triangulaires classiques. 36 observations sont ainsi analysées.

Ces 3 courses sont de type différent:

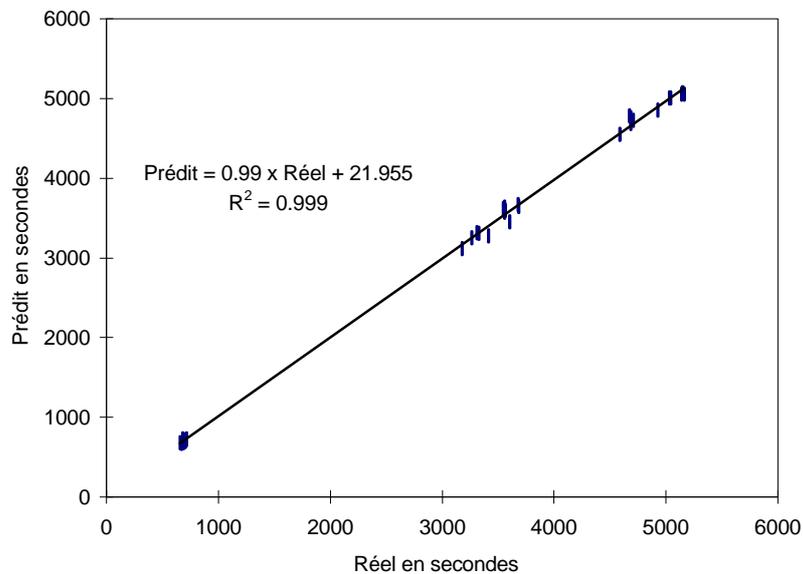
- un prologue sur terrain plat d'une durée inférieure à 10 minutes,
- une épreuve en montagne d'une durée d'environ 1h,
- une épreuve en plaine d'une durée de 1h20,

Pour chaque type de courses, les corrélations temps prédits / temps réels sont significatives ($p < 0.001$)

prologue : $r = 0,627$
 étape de montage : $r = 0,929$
 étape de plaine : $r = 0,971$

Figure 1

**Comparaison Temps Réel et Prédit
 12 coureurs sur 3 Courses**



L'erreur de prédiction ne dépasse pas 1 minute pour la plupart des coureurs. La moyenne des erreurs de prédiction est de 15.5 ± 71 secondes. Cette moyenne est influencée par des erreurs positives ou négatives (surestimation ou sous-estimation) qui peuvent se compenser. Il est donc plus pertinent d'observer les erreurs commises en valeur absolue qui, dans les deux courses de durée respectives de 1 h et 1h20 sont:

$M = 52.17 \pm 48.45$ secondes \Rightarrow % erreur de $1.49\% \pm 1.37\%$ (du temps réel)

$M = 59.42 \pm 33.89$ secondes \Rightarrow % erreur de $1.20\% \pm 0.69\%$ (du temps réel)

Le tableau 1 présentent les résultats d'un autre contre la montre à Disneyland (1997), où une erreur absolue de 29 secondes a été obtenue. La figure 2 montre que si des erreurs existent, elles ne modifient pas la hiérarchie entre les coureurs.

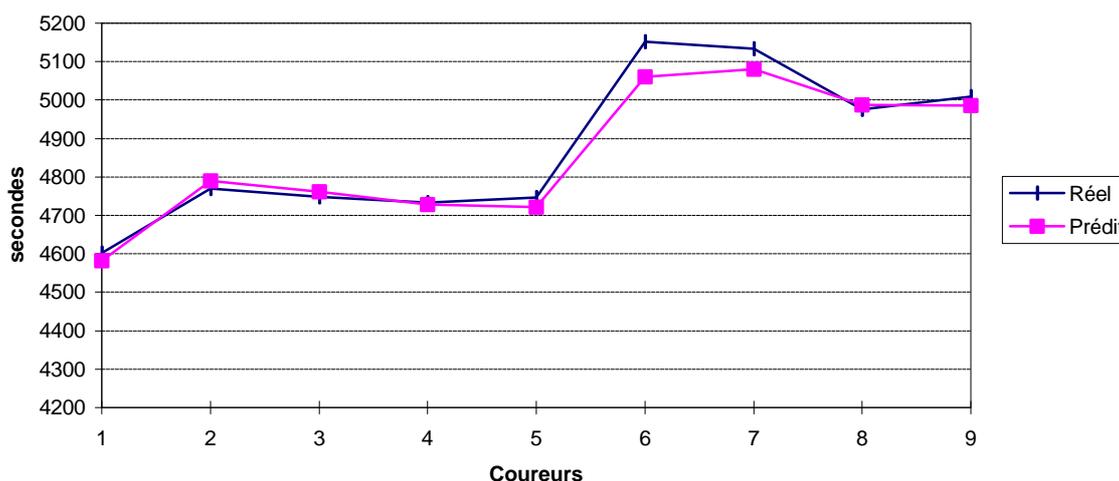
Tableau 1
Contre la montre Disneyland 97 Tour de France

Coureur	Temps Réel minutes	Temps Prédit minutes	Différence secondes	% erreur	Erreur Absolue	% Erreur absolue
1	76.42	76.22	20	0.43%	20	0.43%
2	79.29	79.49	-20	-0.42%	20	0.42%
3	79.08	79.21	-13	-0.27%	13	0.27%
4	78.53	78.49	4	0.08%	4	0.08%
5	79.07	78.42	25	0.53%	25	0.53%
6	85.51	84.20	91	1.77%	91	1.77%
7	85.34	84.41	53	1.03%	53	1.03%
8	82.56	83.08	-12	-0.24%	12	0.24%
9	83.29	83.06	23	0.46%	23	0.46%

Erreur absolue en secondes	29	0.58%
-----------------------------------	-----------	--------------

Figure 2

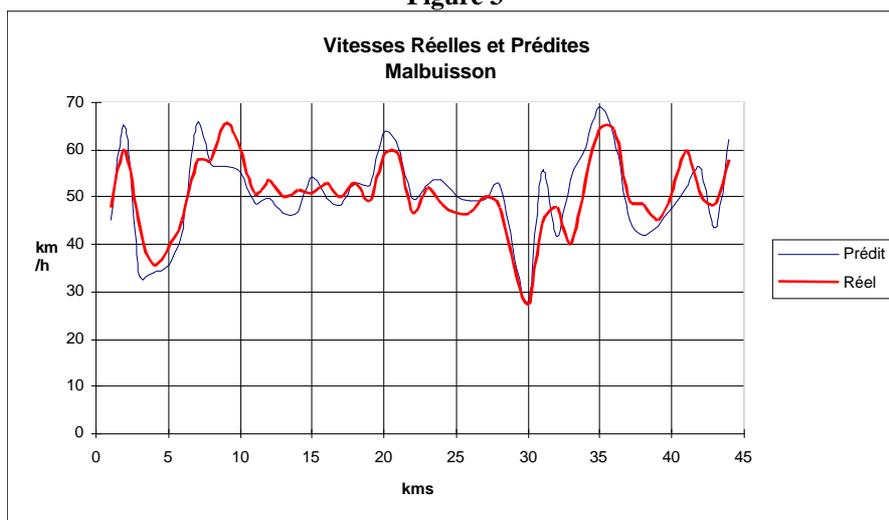
Disneyland Tour de France 97



Analyse des vitesses partielles prédites

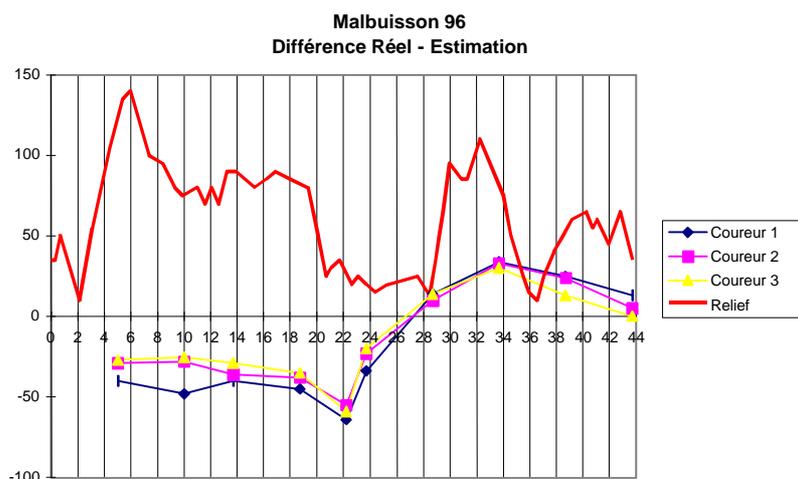
La figure 3 illustre l'analyse des vitesses moyennes réelles et prédites chaque kilomètre pour une épreuve réalisée par un coureur au championnat de France. Les deux profils de vitesse (prédit et réel) sont relativement proches ($r=0.81$). Les erreurs les plus importantes sont souvent commises lors de parties descendantes du parcours par une sous-estimation de la vitesse réelle du coureur dans ce cas alors que les montées semblent correctement estimées.

Figure 3



Le figure 4 illustre la différence constatée au passage à chaque kilomètre entre le temps prédit et le temps réel, pour 3 coureurs différents lors de la même épreuve. Les coureurs ont tous pris de l'avance sur la prédiction jusqu'à mi-parcours, puis ont perdu du temps, et finalement ont terminé très près du temps prédit. Un grand nombre de comparaisons présente ces mêmes caractéristiques.

Figure 4



Discussion

Les résultats obtenus pour les temps prédits sont très significatifs pour les épreuves d'une durée au delà de 10 minutes. En effet, le modèle n'intègre pas la dimension anaérobie de l'effort et ne tient pas compte de la phase initiale d'accélération et paraît donc peu fiable pour une prédiction d'épreuve de courte durée.

Peu d'erreurs sont commises dans l'évaluation de la quantité de travail qu'un coureur peut fournir dans un temps donné. Toutefois la gestion des coureurs ne correspond pas exactement à celle modélisée tout au long du parcours, indiquant que le débit d'énergie mis en œuvre n'est pas aussi uniforme que l'envisage le modèle. Dans la plupart des courses, les coureurs engagent une intensité plus élevée que celle prédite dans la première partie du parcours, puis cette intensité diminue dans le quart suivant, pour correspondre à celle du modèle dans la partie final.

Il devient nécessaire, à ce stade, de recueillir des enregistrements précis des vitesses et des puissances investies (avec les appareils adaptés SRM, Xtrainer) afin d'expliquer les

différences constatées qui peuvent être la conséquence :

soit d'une gestion de course spécifique des coureurs ,

soit d'approximations et d'erreurs dans la modélisation (facteurs de correction)

soit de l'effet de dérive du rendement mécanique global dont il n'est pas tenu compte actuellement. Cette éventuelle dérive du rendement mécanique global (qui se détériore dans le temps lors du maintien d'un effort constant comme l'ont montré des études notamment de Menard ,1992 et d'autres études sur la dérive de VO_2) reste à étudier dans ce modèle.

Toutefois cette modélisation semble suffisamment prédictive pour envisager de l'utiliser comme instrument de contrôle lors de courses réelles, et d'étude de l'influence des facteurs respectifs. L'objectif principal de cette modélisation est en effet de rendre opérationnels des concepts scientifiques et empiriques au moyen d'un programme informatique interactif et ouvert permettant une vérification et une aide en situation réelle de compétition.

Bicycling and Science

Whitt et Wilson, 1975

New approaches to predict VO_{2max} and endurance from running performances.

Tokmakidis SP ; Léger L ; Mercier D ; Péronnet F ; Thibault G

Sports Medecine Physical Fitness, 27 :4 1987 Dec,401-9

Analyse physiologique de la performance en course à pied, révision du modèle hyperbolique

Péronnet F et Thibault G

Journal de physiologie (Paris) 82, 52-60, 1987

Equation of Motion of a cyclist

P.E Di Prampero,G.Cortili, P.Mognoni, F.Saibene

Journal Applied of Physiology, 47: 1,1979;201-206

Modeling road-cycling performance

T.S. Olds, K.I.Norton, E.L.A.Lowe,S.Olive,F.Reay, S.Ly

Journal Applied of Physiology, 78: 4,1995;1596-1611

Contribution à l'amélioration des performances du coureur ccycliste

P.Menard

Etude non publiée Institut aérotechnique de Saint-Cyr CNAM 1992