

Projet de Fin d'Etudes

**Caractérisation de l'effort pour la
conception d'itinéraires cyclables :**

L'émergence d'un modèle



2009-2010

LAPORTE Simon

Directeur de recherche
BAPTISTE Hervé

**Caractérisation de l'effort pour la
conception d'itinéraires cyclables :**

L'émergence d'un modèle

2009-2010

**Directeur de recherche
BAPTISTE Hervé**

LAPORTE Simon

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

FORMATION PAR LA RECHERCHE ET PROJET DE FIN D'ETUDES

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer tout une partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont soutenu, guidé et encouragé lors de cette étude, et plus particulièrement :

M. BAPTISTE Hervé, Enseignant chercheur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours et tuteur de ce projet pour son écoute ses conseils éclairés et sa disponibilité.

M. SAUVANET Gaël, ingénieur en informatique et doctorant diplômé de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours pour ses conseils, sa disponibilité et ses compétences informatiques.

M. SHANG KE, élève ingénieur au département informatique de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours qui a collaboré à la réalisation du modèle pour sa patience et son efficacité.

SOMMAIRE

Avertissement	4
Formation par la recherche et projet de fin d'études	5
Remerciements	6
Sommaire	8
Introduction	10
PARTIE 1	12
Comment définir la notion d'effort ?	12
1. Approche étymologique.....	13
2. L'effort, aspects physiologiques	14
3. L'effort, aspects psychologiques	20
4. Du point de vue de la mécanique.....	24
PARTIE 2	34
Quels sont les critères à retenir pour caractériser l'effort ?	34
1. Le choix de Tours comme territoire d'étude	35
2. L'émergence de critères.....	39
PARTIE 3	50
Vers une modélisation de l'effort	50
1. Le partenariat avec le département informatique	51
2. Les types de trajets possibles	58
3. Comment générer le calcul ?	60
4. L'interface du site	65
Conclusion	68
Bibliographie	70
Table des figures	71
Table des illustrations	72
Table des matières	73
ANNEXES	76

INTRODUCTION

Le vélo semble de nouveau compter parmi les modes de déplacement aux yeux des politiques et particulièrement dans les grandes agglomérations. On a tendance à redécouvrir le vélo avec tous ses atouts. Il est notamment une solution face à la lutte contre la voiture individuelle qui pollue, crée des encombrements, pose des problèmes de sécurité et de stationnement.

Cependant même si cette lutte a déjà commencé depuis longtemps, la part de la voiture par rapport aux autres modes de transports reste largement majoritaire. Ce constat est malheureusement encore plus vrai en France que chez nos voisins d'Europe du nord (Pays Bas, Danemark) où le vélo (malgré le froid) tiens une place beaucoup plus importante.

On doit alors se demander pourquoi on utilise si peu le vélo alors que nous ne manquons pas de pistes, bandes cyclables et autres aménagements.

Il faut trouver les bons leviers pour faire évoluer les mentalités ; le vélo a besoin de plus que des pistes cyclables : des garages sécurisés pour le stationnement, des tenues adéquates pour concilier pratiques sportives et bureau (ou bien des vestiaires), la complémentarité avec d'autres modes de transport (TER, BUS, TRAM...) ou encore une meilleure information sur les itinéraires.

C'est sur ce dernier point que nous nous attarderons plus particulièrement dans ce rapport, en effet les automobilistes disposent bien de nombreux services concernant leurs itinéraires. On peut facilement trouver son trajet le plus adapté suivant des critères économiques, kilométriques ou même touristiques. Il est également facile de prévoir son temps de parcours, le coût en matière d'essence ou de péage.

Et le GPS, toujours plus performant, capable de vous guider sans difficultés (presque) où vous voulez, capable également de calculer en temps réel le parcours optimal en tenant compte du trafic.

Alors pourquoi ne pas adapter ces innovations au vélo, pour encourager la pratique du cyclisme urbain?

C'est l'objet d'une thèse en cours : arriver à créer un GPS pour les vélos. On peut déjà profiter d'un site internet dédié au vélo à Tours nous permettant de trouver le meilleur itinéraire selon deux critères : sécurité et distance. Il s'agit du concept Géovélo, il est maintenant disponible pour les villes de Paris et Nantes et tend à se développer.

Le but de ce rapport est de s'intéresser à la question de l'effort, de tenter de mieux cerner cette notion en vue de la construction d'un modèle. Elle pourra permettre aux futurs internautes de Géovélo de choisir leurs itinéraires suivant un critère lié à l'effort ou encore de prévoir la difficulté d'un parcours.

PARTIE 1
COMMENT DEFINIR LA
NOTION D'EFFORT ?

1. Approche étymologique

Il s'agit dans cette partie de s'interroger sur la notion même d'effort, quelles sont les disciplines à solliciter ? Quels sont les principaux paramètres de l'effort ?

Essayons dans un premier temps de voir si les définitions que l'on peut trouver, le sens ou l'étymologie du mot « effort » peut nous guider pour la suite de la recherche vers d'autres axes d'études.

Cette première étape de la réflexion est indispensable et servira de base de travail pour la suite de ce rapport.

Regardons tout d'abord la définition trouvée dans le dictionnaire :

EFFORT :

« 1. *Mobilisation des forces physiques ou intellectuelles pour vaincre une résistance, surmonter une difficulté, atteindre un objectif.*
2. *Force tendant à déformer un matériau par traction, compression, flexion, torsion ou cisaillement.*¹ »

On peut ainsi percevoir toute la complexité de l'effort après la lecture de cette simple définition. En effet nous avons deux sens distincts, l'un faisant appel à ce que l'on peut qualifier comme étant le sens commun, l'autre est le terme employé dans le cadre de la mécanique.

La première définition indique clairement que l'effort peut être de deux natures différentes selon que l'on considère l'aspect physique ou mental. On introduit également par cette définition deux notions liées à l'effort : la difficulté et l'objectif. Nous verrons par la suite que ce sont des éléments incontournables qui définissent l'effort.

On peut aussi rapprocher les deux sens proposés dans le dictionnaire, l'effort au sens commun n'engendre-t-il pas des « déformations » ou plutôt transformations sur l'Homme ? (Expression du visage, variation des constantes vitales, transpiration...)

D'un point de vue étymologique le terme effort est originaire du Moyen-âge sous l'expression « ESFORTZ » qui provient du latin « FORTIS » signifiant courageux. Le terme va ensuite évoluer pour signifier avec l'expression « ESFORT » une force accompagnée de l'idée de mouvement. Ce qui implique la mobilisation d'une énergie, une volonté orientée vers un objectif.

Essayons de présenter et de détailler ce qu'est l'effort en abordant cet objet suivant différentes disciplines. On doit mobiliser physiologie, psychologie ou encore mécanique afin de tenter de définir l'effort dans sa globalité.

¹ Le Petit LAROUSSE aux éditions Larousse-Bordas, 1998.

2. L'effort, aspects physiologiques

La plupart des études qui ont été menées sur l'effort sont d'ordre médical. Il s'agit par exemple d'évaluer la condition physique d'un patient en vue d'un traitement, de mieux appréhender l'effort dans le cadre scolaire (activités physiques et sportives). On trouve aussi des travaux de recherches dans le cadre du sport de haut niveau.

L'objectif de ce paragraphe est de mobiliser la physiologie pour définir l'effort quantitativement, pour mieux comprendre les processus engagés, expliquer les réactions que l'on perçoit tous (augmentation du rythme cardiaque par exemple). Il sera peut être possible de trouver dans cette approche des éléments qui caractériseront l'effort et permettront ensuite de concevoir un modèle.

21. Les sources d'énergie

On distingue 3 sources différentes de production de l'énergie¹.

La première étant l'**anaérobie alactique**, cette énergie est immédiatement disponible et peut être délivrée par les muscles sur un temps très court (10/15s). Cette énergie est donc utile pour des efforts courts mais intenses car la puissance dégagée est très importante.

Une seconde source énergétique est l'**anaérobie lactique**. Il s'agit de la résultante de l'utilisation des sucres par l'organisme. Dans ce cas l'énergie disponible permet de répondre à une sollicitation plus longue mais moins intense, la durée est de 1 à 2 minutes pour une énergie totale de 3,5kW environ.

Ce type d'effort est limité dans le temps à cause de l'apparition d'acide lactique qui « encrasse » les muscles et ne permettent plus de poursuivre. Cette limite porte le nom de seuil lactique.

Enfin la dernière source d'énergie dépend de l'utilisation et du transport de l'oxygène dans l'organisme. Il s'agit du métabolisme **aérobie** qui est celui mis en œuvre pour des efforts de type long et moins intenses. Ils nous intéressent plus particulièrement dans ce rapport puisqu'il s'agit avant tout de mieux appréhender l'effort lors d'itinéraires cyclables urbains, soit des efforts sur des durées de temps généralement autour de 15/20 minutes. Cette source d'énergie représente environ 1kW.

Ces sources d'énergie sont sensiblement différentes suivant les personnes et ce pour deux raisons majeures. La première est que chaque individu dispose de capacités différentes : densité des fibres musculaires capacité de restitution des sucres, volume d'oxygène transféré aux muscles...

¹ L'ensemble des résultats concernant la physiologie de l'effort sont issus d'ouvrages de médecine cités en bibliographie mais ont été volontairement simplifiés dans le but de rendre ce rapport plus compréhensible.

Il y a ensuite l'entraînement, c'est ce qui différencie l'athlète d'une personne quelconque. La qualité du muscle, le rapport poids/puissance ou encore la VO2 Max sont des éléments que l'on peut améliorer.

Remarque : La VO2max est le volume d'oxygène maximal qu'un individu peut consommer. Elle s'exprime généralement en ml/min/kg.

Ce débit de consommation est un indicateur de la "cylindrée" du sportif. Plus cette valeur est élevée et plus la production d'énergie est importante.

- Les sédentaires disposent d'une VO2max de 40 à 50 ml/min/kg.
- Les sportifs entraînés en endurance (vélo, course à pied, ski de fond...) disposent d'une VO2max de l'ordre de 60 à 65 ml/min/kg.
- Les athlètes de haut niveau disposent d'une VO2max qui peut atteindre les 85 ml/min/kg.

On peut établir des mesures de la VO2max à l'aide de différents protocoles expérimentaux nécessitant des appareils de mesures.

22. Le rôle du cœur et fréquence cardiaque

Le cœur est responsable de l'alimentation en sang et donc en oxygène de l'ensemble de l'organisme. Plus l'organisme est sollicité lors d'un effort de type aérobie, plus le cœur devra alimenter les muscles en oxygène. L'augmentation de cet apport se traduisant par l'évolution du rythme cardiaque. Ainsi, a priori, plus l'effort est important plus la fréquence cardiaque doit être importante.

Les travaux d'Astrand et Ryhming (1954) ont montré que lors d'un exercice progressif, la fréquence cardiaque augmente de façon linéaire avec la vitesse.

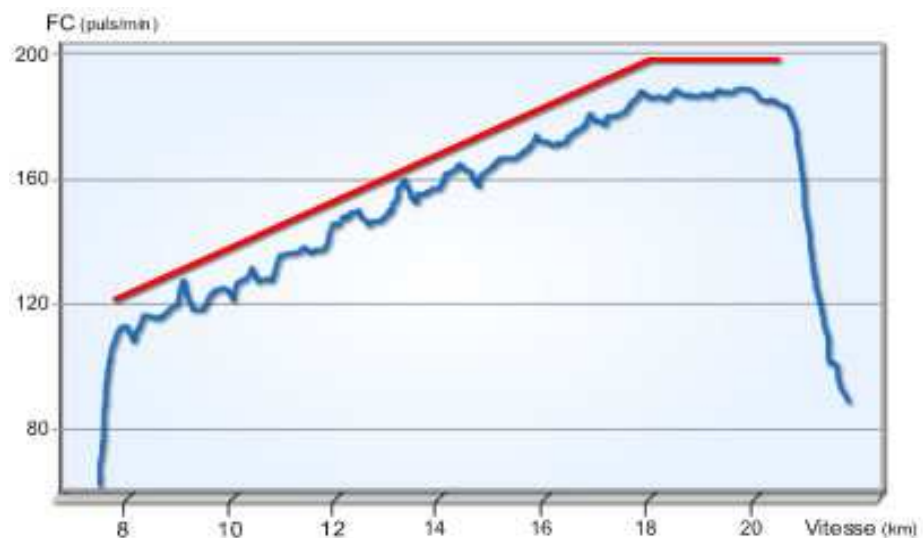


Figure 1 : Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la difficulté de l'exercice

Source : <http://www.volodalen.com/13physiologie/fc.htm> (04/2010)

Avec cette première approche on comprend bien que l'effort, résultat de la mise en œuvre d'un ou plusieurs processus énergétiques, est fonction de paramètres physiques propres à chaque individu.

Le graphe ci-dessus est le résultat expérimental d'un test sur un individu sain lors d'un footing. La vitesse était imposée et augmentait par palier de temps régulier.

On retrouve une multitude de tests plus récents et similaires sur ce principe et les courbes obtenues confirment ce résultat.

On peut également supposer à ce stade de la réflexion que la fréquence cardiaque est un indicateur important puisque la plupart des sportifs d'endurance ou des médecins lors de tests d'effort utilisent un cardiofréquencemètre pour mieux gérer l'effort.

Comment exploiter la fréquence cardiaque ?

On sait que la fréquence cardiaque a une amplitude qui va de 70 battements par minute à 200 au maximum en moyenne.¹

On peut donc dire assez intuitivement que des fréquences inférieures à 100 bpm² correspondent à un très faible effort de l'organisme et que de la même manière des fréquences qui dépassent 170 bpm sont synonymes d'un effort très important.

Cependant deux limites subsistent :

- Comment interpréter les valeurs intermédiaires ?
- Comment comparer deux individus aux aptitudes à priori différentes ? En effet pour un itinéraire donné on peut trouver des courbes de la fréquence cardiaque en fonction du temps différentes selon le niveau ou les aptitudes des personnes choisies.

Nous tenterons donc de répondre à ces problèmes en mobilisant d'autres approches de compréhension de l'effort par la suite.

¹ Ce sont des valeurs moyennes que l'on retrouve dans la littérature cependant on peut considérer que la fréquence cardiaque (FC) s'exprime de la façon suivante : FC max (théorique) = 220-âge.

² Btpm= battements par minutes

23. Les effets du vieillissement sur la performance

Nous avons vu que la fréquence cardiaque maximale théorique s'exprime en fonction de l'âge, en effet on considère que $FC_{max}(théorique) = 220 - \text{âge}$.

On peut donc dire qu'une fréquence cardiaque de 130 peut être assimilée à un effort modéré chez une personne de 18 ans (64% de la FC_{max}) alors que le même rythme cardiaque chez une personne de 50 ans représente 76% de sa FC_{max} .

Un deuxième élément concerne la VO_2max , on a vu que lors d'un effort de plus de 2 minutes la source d'énergie concernée est le processus aérobie.

La capacité à transporter l'oxygène est donc un indicateur de premier ordre.

Hugues Monod dans son ouvrage *Physiologie du sport* propose la relation suivante :

$$VO_2max = 4,975 - 0,034 \times \text{âge}$$

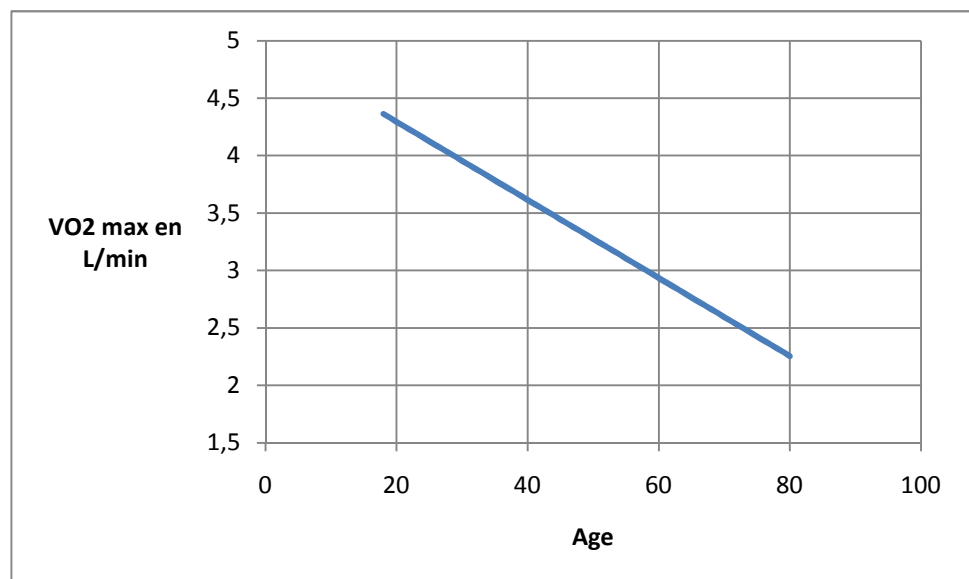


Figure 2: Evolution de la VO_2max avec le temps

Réalisation : Simon LAPORTE

D'après ce graphique on peut dire que les capacités physiques diminuent de façon proportionnelles à la $VO_2 max$ et à la fréquence cardiaque.

Si par la suite on devait prendre en compte le facteur « âge » comme étant une composante de l'effort on pourrait répartir les cyclistes selon des classes d'âge d'amplitudes égales.

Cependant d'autres paramètres entrent en jeu dans les effets du vieillissement sur la performance. Les effets des conditions sociales économiques sont non négligeables dans la mesure où elles ont une influence sur la dépense énergétique quotidienne. Une personne qui ne maintient pas une activité physique régulière, même peu intense, verra ses capacités cardiaques et respiratoires diminuer de façon plus importante et plus rapide qu'une personne plus active. Il est donc difficile de prévoir les capacités d'un sujet d'un âge donné si l'on ne connaît pas son niveau d'activités physiques quotidiennes.

Enfin dans ce paragraphe où l'on parle de l'âge, il faudrait également évaluer l'effort chez les enfants, on peut toutefois considérer que les usagers de Géovélo et donc du modèle de l'effort seront suffisamment âgés pour ne pas prendre en compte les différences qui subsistent face à l'effort par rapport à un jeune adulte.

24. La différence hommes/femmes face à l'effort

D'un point de vue physiologique il existe des différences entre hommes et femmes. On a vu certains indicateurs de l'aptitude physique tels que la fréquence cardiaque ou la VO₂ max.

Ces indicateurs varient suivant le sexe, la valeur de la VO₂ max d'une femme est généralement moins élevée que celle d'un homme.

Ensuite, pour des raisons hormonales, la masse musculaire de la femme est moins importante que celle de l'homme.

Il existe d'autres paramètres physiologiques de ce type qui différencient les aptitudes homme/femme.

Cependant rappelons que l'entraînement améliore largement ces indicateurs et donc la performance. De plus nous verrons dans le paragraphe suivant que l'effort est également l'expression du mental et que la dessus il est difficile de différencier hommes et femmes¹.

Nous évaluerons quantitativement cette différence dans le modèle.²

¹ Il existe toutefois des études montrant que les femmes ont de meilleures facultés mentales face à l'effort. (D. Delignères)

² Voir paragraphe 13 de la partie 3.

On peut après cette rapide présentation des aspects physiologiques de l'effort constater qu'il est possible de distinguer différents types d'efforts suivant par exemple la nature du processus énergétique mis en jeu, suivant l'intensité engagée dans la tâche...

On se base sur des études expérimentales qui consistent à contrôler des variables telles que la fréquence cardiaque, la VO2 Max, le seuil lactique, la tension...

Une des limites de cette approche est qu'elle nécessite un appareillage sophistiqué pour obtenir des données précises.

C'est donc une approche inadaptée au modèle de l'effort, en effet l'effort doit pouvoir être pris en compte sur Géovélo. Nous verrons dans la suite de ce rapport¹ qu'une des contraintes de Géovélo est de pouvoir collecter et traiter des données assez rapidement. De plus il est important pour l'utilisateur du site internet de pouvoir obtenir son itinéraire sans avoir au préalable à fournir une grande quantité d'informations à son sujet.

Essayons maintenant de déterminer si l'effort est seulement le résultat d'une combinaison de paramètres physiologiques ou si une approche plus psychologique peut apporter des éléments plus pragmatiques à l'élaboration d'un modèle de l'effort.

¹ Le fonctionnement et les contraintes liées à Géovélo sont détaillés dans les paragraphes 22 et 31 de la troisième partie.

3. L'effort, aspects psychologiques

Il est pertinent de distinguer l'effort physique de l'effort mental. En effet la partie précédente nous montre que l'effort physique peut assez bien se concevoir et se modéliser cependant est ce réellement la saturation physique qui crée l'arrêt de l'effort ? Ou plutôt un manque de confiance, de concentration ou comme on l'entend de « mental » ?

De plus l'effort mental semble plus difficile à conceptualiser dans le sens où de nombreux processus sont engagés tels que l'attention, la persévérance, le travail, la difficulté perçue...

Nous allons donc essayer dans cette partie de mieux définir le rôle et l'importance des aspects psychologiques face à la difficulté.

On peut donc pour atteindre cet objectif de comprendre l'effort mental mobiliser une bibliographie relative à la performance dans le cadre de la préparation mentale des sportifs de haut niveau¹, on peut également s'intéresser à des ouvrages de psychologie comportementale de manière plus générale².

31.L'investissement dans la tâche

L'effort peut être vu comme une quantité de force engagée dans une tâche, ainsi on ne se base plus sur une fréquence cardiaque ou une performance mais sur une différence entre objectif à atteindre et « repos ».

On peut représenter cette idée par le schéma suivant :

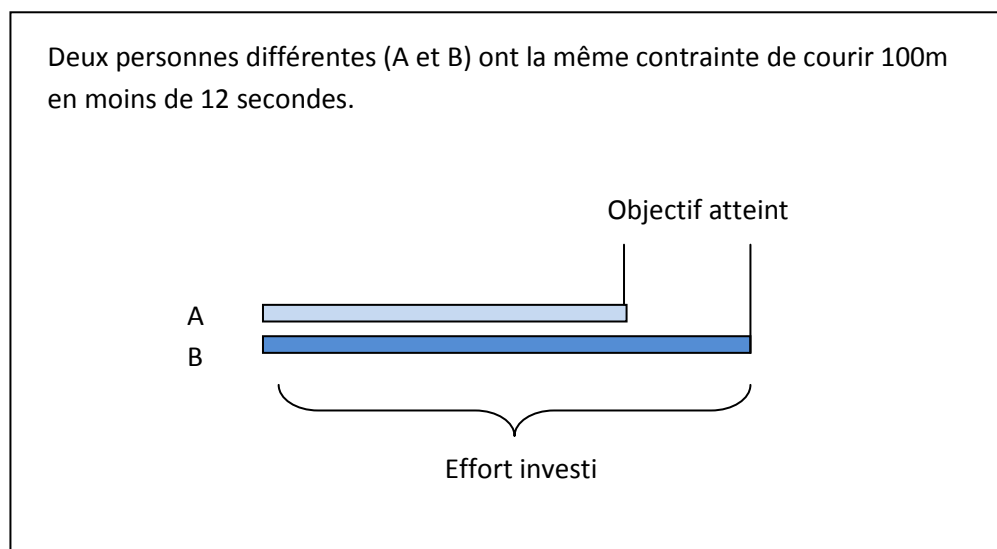


Figure 3 Représentation de l'effort investi

Réalisation : Simon LAPORTE

1 DELIGNIERES D. (2000), L'effort, Paris, Revue EPS, 127p.

2 LE SCNAFF C., LEGRAND F. (2004), Psychologie, Paris, Ellipses, 143p.

On remarque donc que l'objectif à atteindre n'est pas le seul élément à prendre en compte, mais c'est bien cette quantité d'investissement qu'il conviendrait de mesurer, de hiérarchiser puis de modéliser.

En effet la personne B a investi un effort plus important pour atteindre le même objectif que la personne A.

Cependant, pour une même personne cet investissement dans la tâche va varier suivant des paramètres sur lesquels elle ne pourra pas agir directement. On peut notamment penser à la pluie, au vent ou à la condition physique du moment.

Cet aspect de l'effort est plutôt quantitatif mais il implique puisque l'on parle d'aspects psychologiques la notion de volonté et d'implication dans la tâche à accomplir. On peut simplifier ces deux concepts et se ramener à la notion de motivation.

Elle fait appel à de lourds fondements théoriques, l'ouvrage de F. Curry et P. Sarrazin¹ en résume bien les principes.

On distingue principalement 3 théories :

- Autodétermination : Motivation pour accomplir la réalisation de soi.
- Buts d'accomplissement : Motivation orientée vers un but précis (démonstration des compétences)
- Autorégulation : Maintien de l'engagement dans le temps.

Ces théories convergent vers l'idée que la motivation joue un rôle important dans l'effort dans la mesure où elle permet une meilleure acceptation de la difficulté et peut aboutir au développement d'un véritable goût pour l'effort.

32. La difficulté perçue

Cette difficulté, ou charge mentale, n'est pas toujours liée à la difficulté objective d'un exercice donné.

En effet elle semble plus correspondre à la quantité d'investissement dans la tâche. Mais le problème qui se pose alors est celui de la mesure de cette nouvelle variable, et on peut facilement comprendre que la simple question « Avez-vous fourni beaucoup d'efforts? » risque d'être improductive. En effet cette question peut être interprétée suivant la personnalité de l'interrogé. On distingue deux types de réactions possibles :

¹ F.CURRY, P.SARAZIN, (2001), Théories de la motivation et pratiques sportives, PUF, 373p.

- La personne qui se sous-estime : Qui jugera que l'effort investi et donc la difficulté perçue sera supérieure à la difficulté objective de l'exercice proposé.
- La personne qui se surestime : Qui va percevoir la difficulté comme étant inférieure à la difficulté objective de l'exercice.

Nous verrons par la suite que des méthodes ont été mises au point pour évaluer de manière plus fiable cette difficulté perçue que nous appelons aussi effort subjectif.

Nous avons parlé de la notion de rupture ou de poursuite de l'effort lors d'un exercice. On peut notamment penser à l'impact d'une côte à gravir dans le cas de la pratique du vélo.

Ainsi on introduit la notion de maximum subjectif qui correspond au point de rupture de l'effort investi dans une tâche. La difficulté perçue étant jusqu'à ce seuil plus ou moins proportionnelle à l'effort.¹



Figure 4: Relation entre effort et difficulté perçue

Réalisation : Simon LAPORTE

Source: G. BORG (voir Bibliographie)

Ce schéma semble confirmer l'hypothèse selon laquelle la poursuite ou la rupture d'un effort physique est entièrement lié à la perception mentale et plus précisément au seuil du maximum subjectif.

¹ En réalité il s'agit plutôt d'une fonction croissante et convexe.

On peut, pour mieux expliquer ce graphique l'illustrer de l'exemple du cycliste face à la côte à gravir.

La phase croissante de la courbe correspond au cycliste en train de monter, son effort est d'autant plus important que la pente est raide et que l'exercice dure dans le temps. La rupture est le moment où le cycliste refuse l'effort car la difficulté perçue est trop grande, concrètement il descend de son vélo et monte à pied car il ne se sent pas capable ou ne veut pas fournir plus d'effort pour palier au fort pourcentage de la pente.

Le seuil de maximum subjectif étant donc variable d'une personne à l'autre, ou pour une même personne suivant le moment ou peut être l'humeur.

Essayons maintenant de mieux appréhender l'évaluation de la difficulté perçue.¹

Il existe deux types de méthodes pour l'évaluer :

- Les échelles de rapport dont le principe est d'attribuer un nombre correspondant à un niveau d'effort. Le rapport entre ces nombre doit donc correspondre au rapport de difficultés.
- Les échelles de cotations dont le principe est de placer sur une échelle pré définie la difficulté perçue.

Nous retiendrons les échelles de cotation car elles comportent l'avantage non négligeable de pouvoir comparer des individus différents face à une même tâche.

On peut voir en Annexe 1 les instructions relatives à la RPE scale de G.BORG.

Le principe de cette échelle qui s'échelonne de 6 à 20 est d'attribuer une valeur à l'effort ressenti. 20 étant le maximum. Pour une meilleure compréhension et fiabilité l'échelle est accompagnée d'un ensemble de termes de type « très léger », « difficile », « extrêmement difficile ».

Cette échelle est reconnue par la communauté scientifique grâce à un solide fondement théorique que l'on retrouve dans l'ouvrage de G.Borg.

Une particularité de cette échelle est que le nombre attribué par l'utilisateur correspond à sa fréquence cardiaque divisée par 10, alors que c'est bien une échelle de perception de l'effort.

On met ici en évidence le lien qui existe entre charge mentale et effort physique.

¹ Les travaux les plus connus sur le sujet sont ceux de G. Borg. Il est l'auteur de la fameuse RPE scale mentionnée dans ce rapport.

4. Du point de vue de la mécanique

Il serait dommage de parler d'effort et de vélo sans mobiliser la science du mouvement : la mécanique. Dans cette partie seront donc abordées quelques notions de base sur les forces mises en jeux. Nous nous concentreront dans cette partie à l'étude des forces appliquées à la pratique du vélo dans le référentiel terrestre.

L'objectif est de pouvoir utiliser un ensemble d'équations relatives au vélo. Ces équations peuvent-elles être utilisées dans Géovélo ? Correspondent-elles réellement au concept d'effort ?

Nous axerons les recherches sur l'étude du mouvement si possible à vélo notamment grâce aux ouvrages de H. MONOD, H. LAMENDIN et D. COURTEIX¹

L'ensemble du travail musculaire que met en œuvre l'organisme pour avoir un comportement moteur s'oppose à trois types de forces principales :

41. Les résistances aérodynamiques

Lors d'un mouvement, à pied ou à vélo, le corps doit faire face à la force de résistance de l'air. En effet cette force de résistance est variable selon la corpulence de l'individu, sa position sur la machine et éventuellement de son matériel. On verra quantitativement par la suite que la position d'un cycliste sur son vélo influence largement la dépense énergétique nécessaire au mouvement.

On peut ainsi trouver dans les études relatives aux performances sportives (notamment en cyclisme) que la résistance aérodynamique s'exprime en fonction du carré de la vitesse de progression dans l'air.

On exprime donc la résistance aérodynamique, exprimée en newton, par la formule suivante :

$$R_{\text{(aérodynamique)}} = SC_x \cdot \rho \cdot 0,5 \cdot v^3$$

Où

SC_x : le coefficient de résistance aérodynamique. [m²]

ρ : la masse volumique de l'air. [kg.m⁻³]

v : la vitesse [m/s]

Le coefficient de résistance aérodynamique dépend donc de l'utilisateur et de l'usage de son vélo. En effet une personne à forte corpulence en position haute sur son vélo aura forcément une résistance supérieure à un cycliste aguerri allongé sur sa machine !

¹ Voir bibliographie

Suivant le type d'utilisateur qui nous intéresse dans cette étude nous prendrons la valeur moyenne de $SC_x=0,50m^2$ correspondant à une position décontractée sur un vélo de ville. La moyenne étant sur la différence de corpulence (à priori) homme/femme

De plus on peut considérer que la masse volumique de l'air est égale à $1,2kg.m^{-3}$ (20°C et 40% d'humidité relative).

On peut donc avoir une idée, sur un terrain plat et sans vent, de la puissance nécessaire en fonction de la vitesse pour lutter contre cette force de résistance aérodynamique.

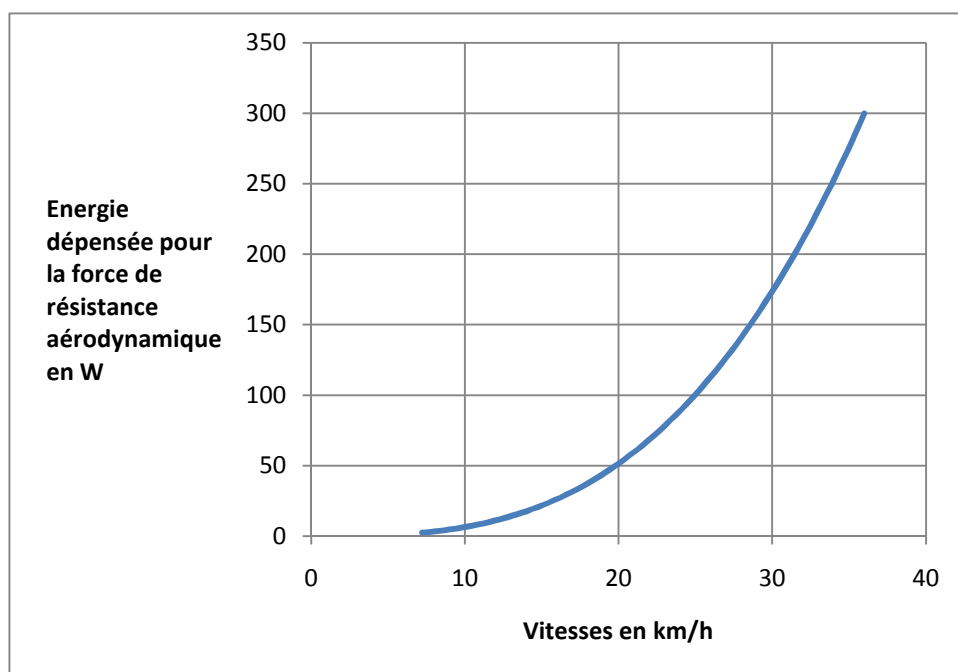


Figure 5 La force de résistance aérodynamique

Réalisation : Simon LAPORTE

On comprend ainsi pourquoi il est plus difficile de passer de 30 à 35km/h (105W) que de 15 à 25 km/h (79W).

Il s'agira donc par la suite de trouver une relation (si elle existe) entre ce travail fourni et l'effort consenti par le sujet.

Rappelons que l'objectif de cette partie est de pouvoir d'une part définir l'effort à travers une approche scientifique quantifiable et d'autre part pouvoir vérifier si l'on peut transposer ces résultats pour les appliquer à Géovélo.

42. Les forces de frottements

Ces forces de frottement dans le cadre du vélo correspondent à la friction des pièces entre elles et surtout au contact des roues avec le sol.

On peut représenter ces forces par une équation de la forme :

$$R_{\text{(frottements)}} = 0,1 \cdot m \cdot v^1$$

Où

m est la masse totale (cycliste+matériel) exprimée en kg.

v la vitesse à laquelle évolue le cycliste en m/s.

De la même manière on peut représenter graphiquement l'influence des forces de frottement sur la quantité de travail à fournir.

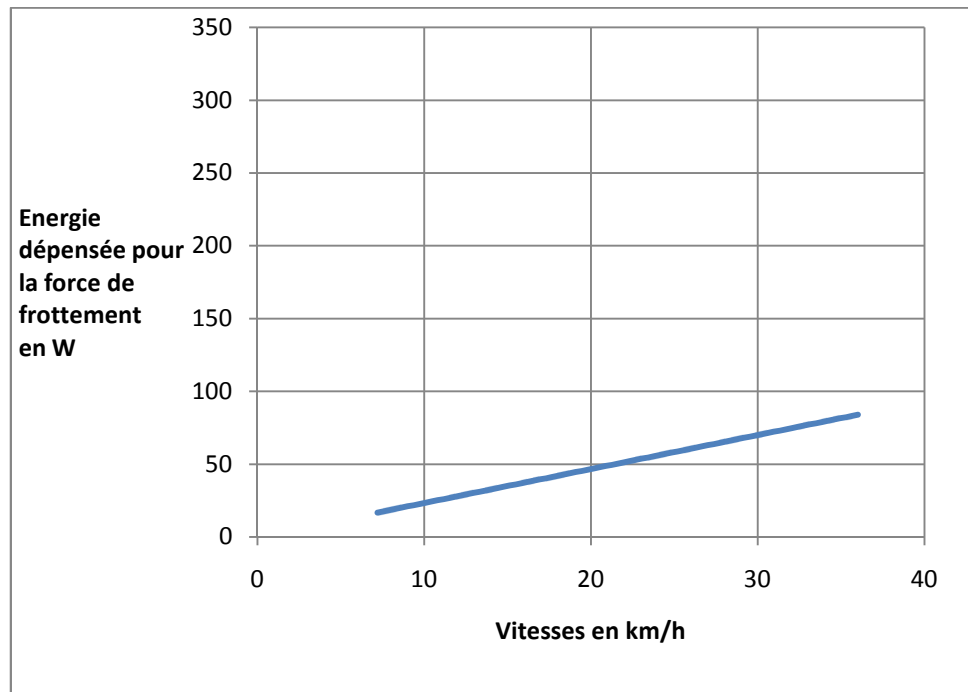


Figure 6 La force de frottement

Réalisation : Simon LAPORTE

On voit bien que plus la vitesse augmente plus les forces de frottement sont négligeables par rapport à la résistance de l'air. Par exemple à 20 km/h les deux forces nécessitent 50W chacune pour maintenir la vitesse (ratio=1). En revanche à 35 km/h 265W sont nécessaires pour lutter contre la résistance de l'air contre 82W pour les frottements soit un ratio de 3,2.

¹ Le coefficient 0,1 correspond à une approximation prenant en compte des pneus « standards » sur une route en bitume.

43. La force gravitationnelle

Résistance aérodynamique, frottements, mais il ne faut pas oublier qu'un itinéraire impose au cycliste des paramètres topographiques. Il faut donc intégrer le facteur pente qui représente un surcoût considérable pour le cycliste en matière de dépense énergétique.

De la même manière on peut modéliser ce paramètre par l'équation suivante :

$$E = M \cdot g \cdot \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad ^1$$

Où

- E est l'énergie dépensée [W]
- M la masse cycliste+matériel [kg]
- g la force de gravité (9,8 kg.m/s²)
- ΔH la différence de hauteur en m
- ΔT le temps de parcours en s

On peut cependant transformer cette formule pour travailler avec les paramètres de pente et de vitesse afin de limiter le nombre de variable par rapport aux formules précédentes.

Ainsi si on considère les formules de pente et de vitesse suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{\Delta H}{D} \\ V = \frac{D}{\Delta T} \end{array} \right.$$

Où

- V la vitesse en m/s
- P la pente
- D la distance en m
- ΔH la différence de hauteur en m
- ΔT le temps de parcours en s

On a alors facilement par substitution $p = \frac{\Delta H}{V \Delta T}$

¹ Formule issue de Biologie et pratique sportive par H LAMENDIN et D. COURTEIX

D'où

$$E = M.g .p.V$$

Où

- E : la puissance nécessaire en W
- M : la masse vélo+ cycliste en kg
- g : la force de gravité (9,8 kg.m/s²)
- p : la pente
- V : la vitesse en m/s

Ainsi prenons l'exemple d'un parcours à vitesse constante (arbitrairement 11km/h) et regardons l'effet de la pente sur la puissance nécessaire à développer pour maintenir cette vitesse.

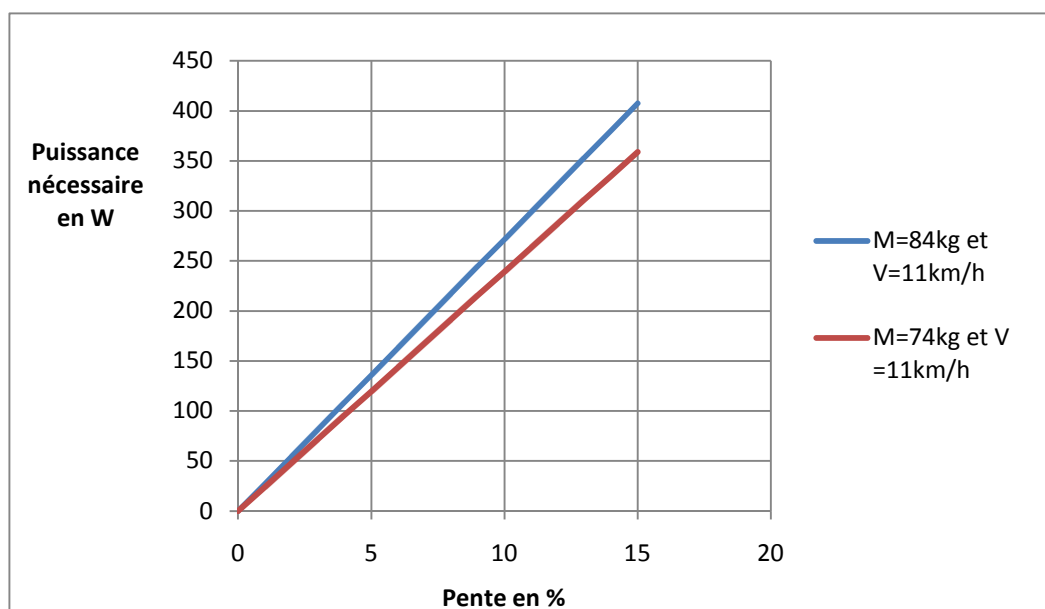


Figure 7 Influence de la pente sur l'effort

Réalisation : Simon LAPORTE

On constate que la puissance nécessaire pour maintenir cette vitesse de 11km/h devient importante dès 5% de pente. Or on retrouve ces pourcentages assez fréquemment sur le territoire d'étude choisi.

En pratique, lorsqu'un cycliste est confronté à un obstacle tel que la pente il diminue sa vitesse ou bien renonce au parcours concerné car la difficulté peut généralement sembler insurmontable. On se réfère alors à la notion de point de rupture présentée dans le paragraphe 32 de cette partie.

44. Une formule globale

On peut regrouper l'ensemble des formules précédentes ce qui correspond donc à la dépense énergétique globale en fonction de la vitesse, la pente et la masse totale en mouvement.

$$E = V. [M. (9,8.P + 0,1) + 0,3.V^3]$$

Où

- E : la dépense énergétique en W
- V : La vitesse de déplacement en m/s
- M : La masse Homme + machine en kg
- P : La pente en %

Essayons donc de représenter graphiquement ces trois variables avec des valeurs de pentes différentes et de voir quelles sont leur degré de corrélation.

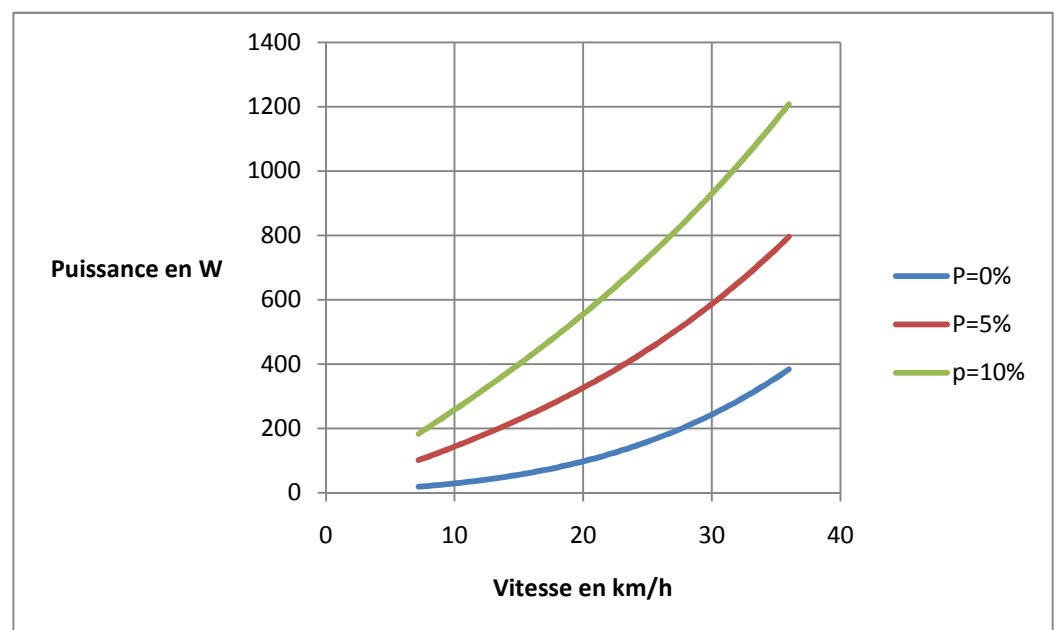


Figure 8 Effort à fournir en fonction de la pente et de la vitesse

Réalisation : Simon LAPORTE

Ce graphique nous permet donc de comparer deux efforts a priori différents. Par exemple d'après le graphique rouler à 20km/h sur le plat nécessiterait le même effort que de rouler à 8km/h sur une pente à 5%.

Pour se ramener au problème de la modélisation de l'effort on peut se demander quel type de pente devra être privilégié.

A 10km/h, vitesse déjà faible sur un vélo, une pente de 10% nécessite une puissance de près de 300W, contre 180W pour une pente de 5% ainsi la pente de 10% va entraîner une forte augmentation du rythme cardiaque et une sollicitation musculaire plus importante. Les conséquences sont des sensations plus désagréables avec une phase de récupération plus longue.

On peut donc dire qu'il faudra privilégier dans la mesure du possible des pentes à faible pourcentage pour éviter que le cycliste ait à fournir un effort trop important.

Le graphique suivant montre le résultat de données expérimentales réalisées lors d'un test sur cycloergomètre.¹

- Conditions expérimentales :

Sujet : Homme sportif

Age : 21 ans

Taille : 178 cm

Poids : 76 kg

- But du test : Mesurer l'évolution de la fréquence cardiaque en maintenant une fréquence de pédalage alors que la charge augmente par paliers réguliers toutes les 2 minutes.

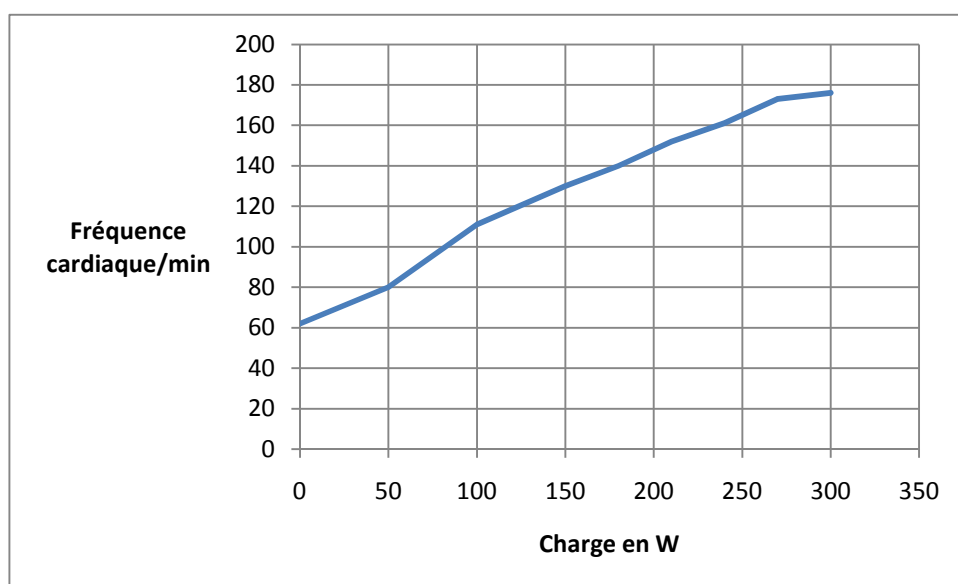


Figure 9 Rapport puissance fréquence cardiaque

Réalisation : Simon LAPORTE

¹ Un ergomètre est une machine permettant de reproduire le mouvement que l'on ferait si l'on était sur de vrais appareils, ex un tapis roulant. Le cycloergomètre au sens générique est un vélo d'appartement.

Ainsi on peut avoir une idée de la correspondance entre la charge de travail et une fréquence cardiaque correspondante.

Nous verrons par la suite que les fréquences cardiaques peuvent également être « traduites » suivant le niveau d'effort¹.

On peut cependant trouver une première limite à cette approche car elle n'intègre pas explicitement la notion de distance, or l'effort doit pouvoir s'intégrer à Géovélo et correspondra à une valeur associée à un arc.²

¹ Voir annexes 2

² Principe de fonctionnement de Géovélo: voir partie 31 de la troisième partie.

Synthèse de la première partie

Cette partie permet de se faire une idée plus précise de ce qu'est l'effort en général, on distingue deux aspects de l'effort : physique et mental. L'un est quantifiable, bénéficie d'expériences, d'études et de tests conséquents alors que l'aspect mental est plus difficile à évaluer, car beaucoup plus subjectif.

On peut également, par l'approche mécanique, arriver à quantifier le mouvement d'un cycliste en termes de travail à fournir, de puissance nécessaire. Cependant quelques questions subsistent : Comment intégrer l'aspect mental aux équations de la mécanique ? Comment faire le lien entre travail à fournir et effort perçu ?

Ou plus précisément comment à partir de ces résultats arriver à un modèle de l'effort?

Il faut également, pour répondre à la problématique, prendre en compte les contraintes que suggère la modélisation; à savoir quelles sont les données disponibles ? Sur quel terrain d'étude est-il pertinent de travailler?

De plus l'approche mécanique de l'effort est séduisante car elle décrit à l'aide d'équations le mouvement en nous donnant la puissance à fournir en fonction du matériel, de la pente et de la vitesse. On peut donc être tenté d'utiliser directement ces équations dans Géovélo.

Cependant on remarque que le calcul est trop largement influencé par la vitesse et ne prend pas en compte la distance parcourue. De plus cette approche ne laisse pas la place aux critères mis en évidence dans les paragraphes 2 et 3 de cette partie.

Ainsi nous détaillerons par la suite la méthode de conception d'un modèle qui consistera à déterminer et agencer un ensemble de critères permettant de définir au mieux l'effort dans le cadre du vélo en ville.

Les résultats obtenus par les équations de la mécanique permettront cependant d'apporter une validation au modèle proposé.

Il s'agira donc dans la deuxième partie de ce rapport de faire évoluer la recherche vers la détermination d'un ensemble de critères qui vont (ou non) devenir les variables du modèle d'effort.

L'idée à retenir est que l'effort est le résultat de la combinaison d'une multitude de paramètres sur lesquels l'individu ne peut pas toujours agir. On peut également dire à ce stade que l'effort est individualisé dans la mesure où les deux aspects de l'effort renvoient à des éléments propres à chacun et qui évoluent au cours du temps et en fonction des circonstances.

PARTIE 2

**QUELS SONT LES CRITERES A
RETENIR POUR CARACTERISER
L'EFFORT ?**

Dans cette partie nous allons essayer de nous placer du point de vue de l'aménagement et essayer de mobiliser les critères d'efforts qui, compte tenu des données géographiques relatives au terrain d'étude, vont prendre des places plus ou moins importantes dans le modèle.

1. Le choix de Tours comme territoire d'étude

Lorsque l'on parle de modélisation il est intéressant de pouvoir mettre à l'épreuve et de tester le modèle proposé. Il est donc important de trouver un territoire d'étude approprié. Nous justifierons le choix de Tours pour mettre le modèle en pratique. Il s'agit également de s'interroger sur les contraintes liées à ce territoire d'étude.

11. Un territoire connu où une expérimentation est possible

Cette recherche qui a pour objectif de proposer une modélisation de l'effort nécessite une certaine pratique du terrain. En effet en tant que cycliste il m'est possible de vérifier certaines données sur le terrain et ainsi apporter un regard critique sur les résultats obtenus¹.

C'est donc pour cette proximité du territoire d'étude que Tours a été l'endroit le plus pertinent.

12. Un modèle existant : Géovélo²

Tours bénéficie déjà d'une attention particulière en ce qui concerne la pratique du vélo. Gaël Sauvanet, ingénieur, en préparation d'une thèse d'informatique, s'est intéressé aux cheminements vélo.

Sa thèse, en partenariat avec l'association « Autour Du Train », consiste à aborder le problème des méthodes de calcul appliquées aux itinéraires cyclables.

Dans ce cadre il est responsable des aspects techniques du projet Géovélo, en effet il s'occupe du site internet, de la programmation des calculs et de la gestion des bases de données.

Ce site internet et ses applications dérivées (sur mobile puis plus tard sous forme de GPS) permettent aux cyclistes de pouvoir disposer d'un outil permettant de trouver l'itinéraire qui leur correspond. Ainsi on peut sur une carte interactive placer un point

¹¹ Voir le paragraphe 31 où l'on parle d'imprécision des données ressources.

² <http://www.geovelo.fr/>

de départ et d'arrivée. Le choix de l'itinéraire se fera selon deux critères : la distance ou la sécurité.

En effet l'algorithme va proposer soit un itinéraire avec une distance minimale soit (avec une distance supérieure mais restant raisonnable) un itinéraire qui emprunte plus de pistes ou bandes cyclable et évite les « points noirs » correspondant à des carrefours ou axes dits à risque.

D'un point de vue technique le calcul est réalisé suivant le principe de l'algorithme de Dijkstra¹ mais adapté au multicritère. Le réseau routier du territoire concerné est divisé en tronçons que l'on appelle « arcs ». A chacun de ces arcs sont attribuées des données telles que la distance, le nom ou encore un « coût » concernant la sécurité de cet arc.

Selon le critère choisi l'algorithme va évaluer les itinéraires possibles en calculant la valeur du coût global.

Concernant le facteur sécurité un travail de recherche a été mené par Clément Gerber², il s'agissait pour lui de proposer un fondement théorique permettant de justifier la valeur du coût attribué sur chaque arc.

En réalité le calcul de la sécurité s'effectue de la manière suivante :

- On associe une valeur à un type d'aménagement :
 - 1 : pour les pistes cyclables
 - 1,3 : pour les bandes cyclables
 - 1,5 : pour les voies mixtes
 - 2 : pour les autres routes

- On y ajoute une valeur en fonction du ressenti de la sécurité sur le terrain (très subjectif)
 - +0 : si la voie est conseillée
 - +2 : si la voie est déconseillée
 - +4 : si la voie est fortement déconseillée

- Enfin, on multiplie la valeur obtenue par la longueur de l'arc.

Le processus est réitéré sur tout le trajet, il suffit de faire la somme de ces valeurs pour obtenir la valeur globale de la sécurité sur le trajet.

On déplore la grande différence avec le modèle proposé par C. Gerber dans son PFE³.

Le site Géovélo permet également aux usagers de consulter une feuille de route d'évaluer leur temps de parcours ou encore de consulter la météo de la journée.

Actuellement Géovélo est disponible pour les villes de Tours, Paris et Nantes mais tend à se développer dans d'autres agglomérations.

¹ On retrouve une description complète de l'algorithme et de la théorie des graphes en général dans l'ouvrage de J-C FOURNIER : Théorie des graphes et applications.

²,³ Voir bibliographie

Le fait qu'un tel site existe sur Tours constitue un deuxième avantage qui a motivé le choix de cette ville comme territoire d'étude. L'idée est bien de pouvoir intégrer à terme un critère supplémentaire à Géovélo: l'effort que représente tel ou tel itinéraire. Il sera également intéressant de pouvoir choisir un itinéraire en fonction de ce critère.

13.Des contraintes liées à la topographie du territoire

En dépit des avantages cités précédemment, Tours par sa configuration topographique, risque de limiter les choix d'itinéraires alternatifs. En effet le centre de Tours (entre Loire et Cher) est relativement plat à une altitude de 48m mais l'agglomération s'étend au nord et au sud sur deux plateaux d'altitudes respectives 100m et 90m environ. La configuration « Deux plateaux encadrant une vallée » ne permet pas de contournement¹ possible, un cycliste pour se rendre de Tours Centre à Tours Sud doit forcément franchir une côte. Le problème sera donc d'évaluer s'il existe des itinéraires à privilégier en fonction du pourcentage des différentes pentes.

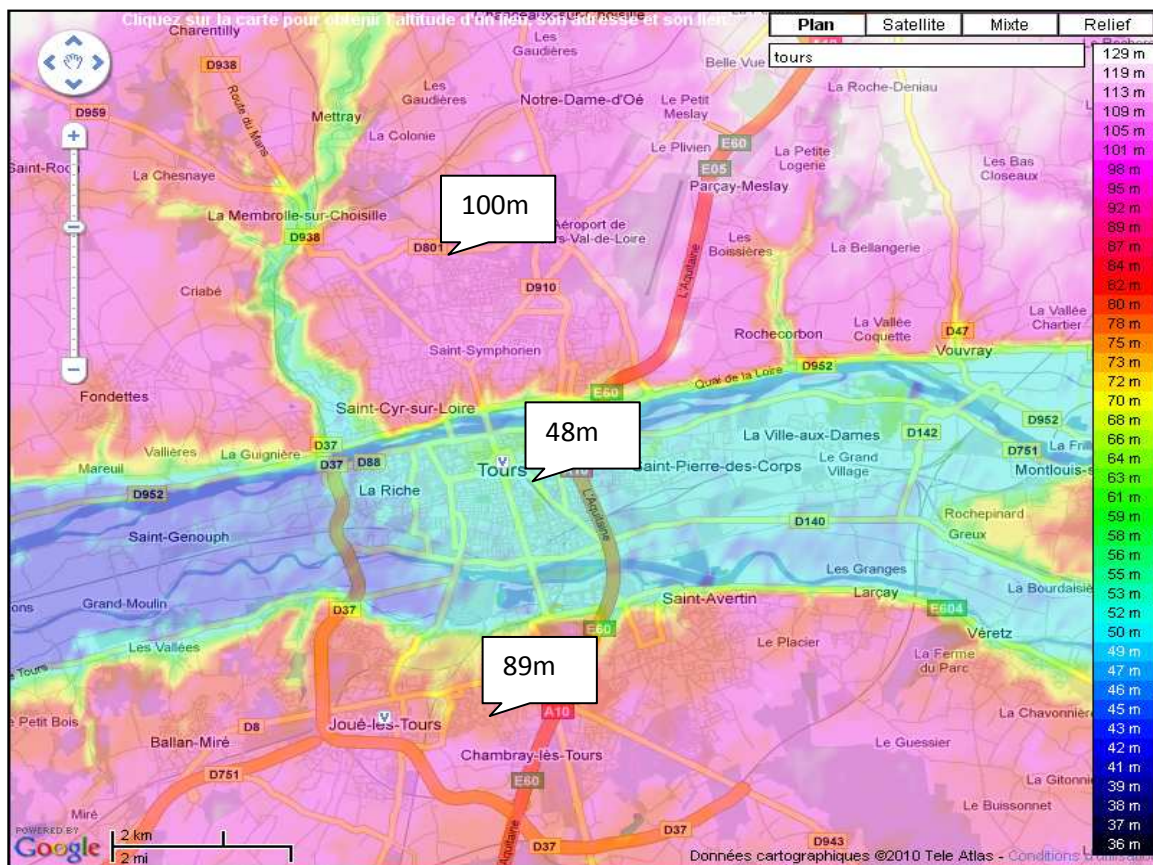


Illustration 1: Topographie de Tours
 Source : <http://www.cartes-topographiques.fr/>

¹ On entend contournement dans le sens où on a un itinéraire passant par une bute (donc une montée) pour relier A à B et un autre itinéraire (plus long) contournant cette bute pour se rendre de A à B et ainsi ne pas avoir de côte à gravir.

Il est possible de se pencher sur d'autres exemples de réseaux dans d'autres agglomérations où lors d'un trajet on peut trouver une alternative à la pente (quitte à augmenter la distance parcourue).

Cependant il est difficile de pouvoir vérifier la pertinence des chemins de contournement si l'on ne possède pas de données fiables relatives aux distances et aux pentes.

Une autre piste d'étude est donc de faire appel à des espaces théoriques afin de vérifier la capacité du modèle à éviter une pente trop forte et donc minimiser l'effort.

Exemple d'espace théorique:

Il s'agit pour un cycliste de se rendre d'un point A à un point C, deux itinéraires sont possibles, l'un plus court avec une côte à gravir et l'autre dit de contournement, un peu plus long mais quasiment plat.

Données :

- Chemin1 (ABC): $d_3+d_4= 800\text{m}$ $P_3=1\%$, $P_4=0\%$
- Chemin2 (ADC): $d_1+d_2= 500\text{m}$ $P_1=5\%$, $P_2= -1\%$

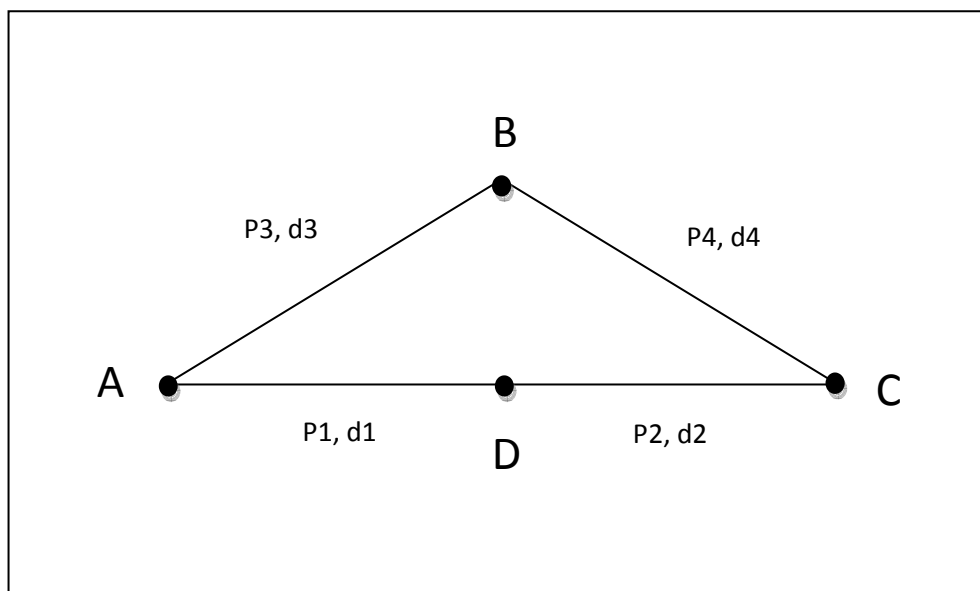


Figure 10: Chemin de contournement

Réalisation : Simon LAPORTE

Compte tenu des résultats précédents le modèle devra favoriser le chemin1.

En effet on remarque que ce chemin (ABC) emprunte une pente à faible pourcentage (1%) pour une distance totale de 800m alors que l'autre, ADC, est plus court (500m) mais nécessite de gravir une côte à 5%. Or on peut voir dans le paragraphe 44 de la partie 1 qu'une pente à fort pourcentage entraîne une dépense énergétique importante (bien plus que les 300m sur le plat supplémentaires du chemin 1). D'où le choix du chemin 1 si l'on veut un itinéraire moins difficile.

Il faudra en revanche déterminer dans quelles mesures la distance et le temps de parcours d'un chemin de contournement restent acceptables pour l'utilisateur.

2. L'émergence de critères

Comme on a pu le voir dans la première partie de ce rapport l'effort comporte différentes composantes selon l'approche considérée, mais on ne peut pas utiliser directement l'une ou l'autre pour arriver à répondre aux contraintes de modélisation sur Géovélo.

L'objectif est maintenant de dégager, à partir de l'interprétation des résultats précédents, l'ensemble des variables de l'effort avant de pouvoir ensuite les assembler entre elles.

21. Les données disponibles

Il s'agit d'évaluer l'ensemble des données que l'on peut obtenir sur l'ensemble des arcs du graphe correspondant au réseau routier de Tours.

Il y a également une contrainte à prendre en compte : le but de Géovélo est de pouvoir s'adapter rapidement à d'autres réseaux et à d'autres villes. Ainsi il faut se baser sur des données disponibles non seulement à Tours mais aussi dans de nombreuses agglomérations.

L'effort est largement influencé par des critères propres à l'individu ou éventuellement à des groupes d'individus. L'ensemble de ce type de données peuvent donc à priori être renseignées par l'utilisateur, il s'agit d'informations sur l'âge, le sexe, la condition physique ou encore le type de vélo utilisé. Nous verrons dans la partie 32 une liste exhaustive de ces critères.

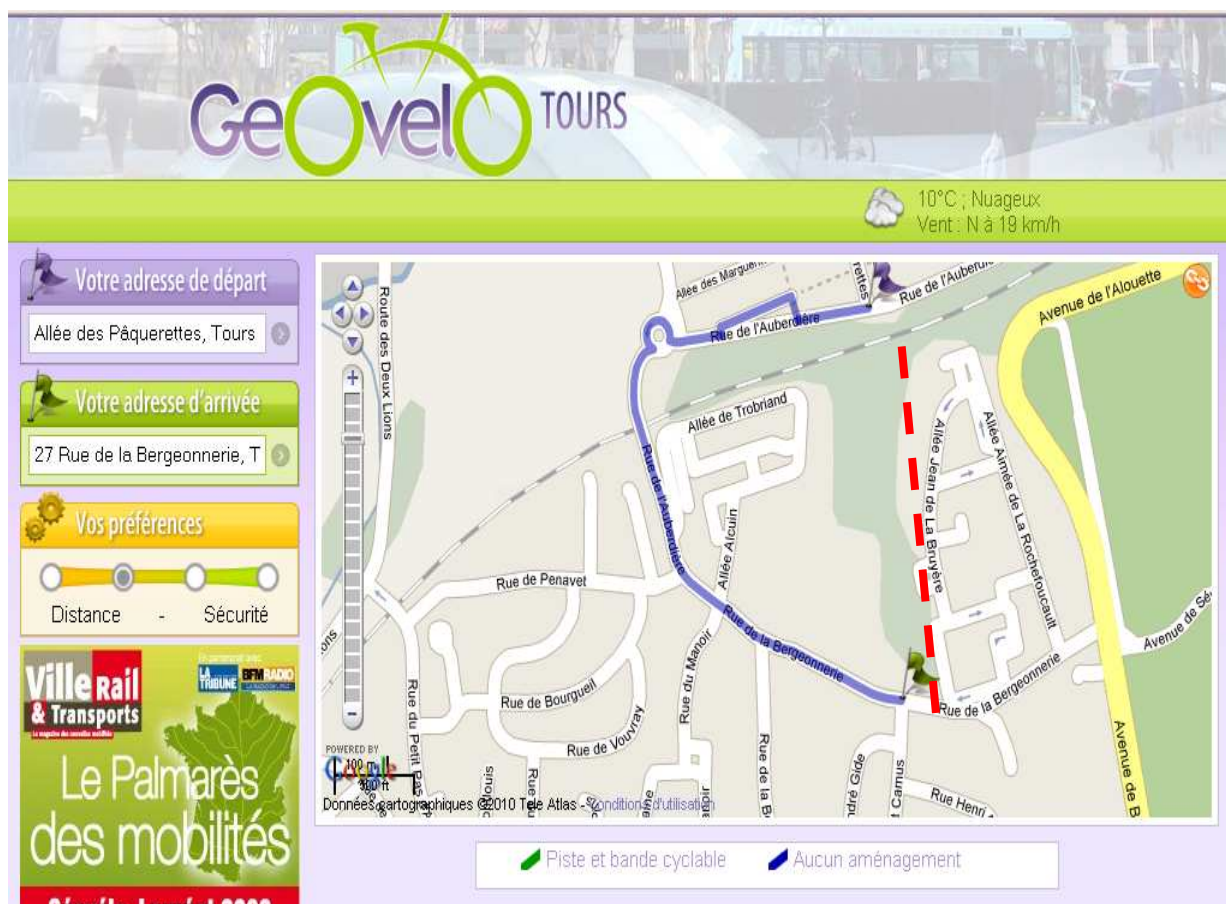
Il est ensuite possible d'obtenir des données relatives à la morphologie du réseau qu'il soit cyclable ou routier et principalement la distance en mètre pour chaque arc.

A propos de Géovélo, la version initiale sur Tours utilise les données de Télé Atlas¹ avec une licence payante. Cette base de données permet de rassembler les données relatives au réseau et reste exploitable avec les données cartographiques de Google Map.

La base de données de l'IGN a été écartée car les mises à jour s'avéraient trop longues, l'autre problème était que la vente des données relatives à la navigation (sens de circulation, manœuvres interdites...) n'a pas été poursuivie.

Les sites Géovélo relatifs à Paris et Nantes utilisent les données OpenStreetMap qui sont gratuites et libres.

Cependant on déplore d'après des relevés de terrains certaines erreurs. En effet l'ensemble du réseau cyclable n'apparaît pas encore sur Géovélo (exemple du bois de la Bergeonnerie qui ne figure pas parmi les données). On peut voir sur l'illustration suivante l'itinéraire (en bleu) proposé par Géovélo alors qu'en réalité il existe un sentier sécurisé et beaucoup plus court.



--- Sentier existant en réalité

Illustration 2: Exemple du décalage entre le modèle et la réalité sur Géovélo

Réalisation : Simon LAPORTE

Source : <http://www.geovelo.fr/>

¹ <http://teletlas.com>

Concernant les pentes il est possible pour chaque nœud du graphe utilisé d'utiliser les données relatives à l'altitude du point. On peut ainsi trouver facilement la pente en pourcentage en utilisant ces informations et la distance. En effet on a la relation suivante :

$$P = \frac{(Altitude2 - Altitude1) / Distance}{100}$$

Où

P est la pente exprimée en pourcentage

Altitude exprimée en mètres

Distance en mètres

On se heurte une nouvelle fois au problème des données, en effet une alternative aux BD TOPO ou BD ALTI de l'IGN qui ont le défaut d'être payantes peut être une base de données fournie par la NASA: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)¹. Elle est la base utilisée dans le modèle mais n'assure une donnée que tout les 90m, ce qui laisse malheureusement de nombreuses imprécisions par rapport aux données de terrain.

Cependant les bases évoluent rapidement et il semble qu'une nouvelle base de données gratuite avec une précision de 30m soit en cours de réalisation par la NASA.

Nous verrons également dans le paragraphe suivant que les conditions climatiques influencent largement la pénibilité d'un trajet à vélo.

Il est donc possible d'utiliser les données fournies par la météo et de les intégrer au calcul d'évaluation de l'effort.

22. Approche théorique

Maintenant que nous avons mieux défini l'effort nous avons une vision plus globale permettant de définir un ensemble de paramètres qui sont à prendre en compte pour modéliser un effort.

Nous allons utiliser l'approche des dynamiciens pour classer l'ensemble de ces critères. Cette théorie² définit un comportement moteur par l'interaction d'un ensemble de critères sur le système donné (ici l'Homme).

On distingue trois types de contraintes comme le montre l'organigramme suivant. Ces 3 paramètres seront détaillés en adaptant des critères propres au territoire d'étude et à la problématique de ce sujet.

¹ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

² NEWELL, K.M., Constraints on the development of coordination, in Wade, 1986 p.341-360

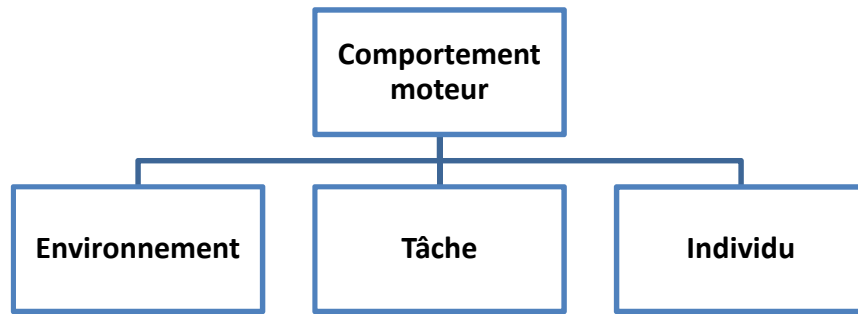


Figure 11: Composantes du comportement moteur

Réalisation : Simon LAPORTE

- **Environnement** : Tout ce qui s'impose à la personne, ce qui l'entoure.
- **Tâche** : C'est l'objectif à atteindre, les contraintes ou consignes de l'exercice.
- **Individu** : Représente les caractéristiques physiques ou mentales d'une personne.

Ce comportement moteur sera alors le fruit d'un effort plus ou moins important, nous verrons plus précisément comment quantifier cet effort dans la troisième partie de ce rapport.

Nous allons maintenant détailler chacun des paramètres de l'organigramme ci-dessus en utilisant des critères propres au territoire et ces caractéristiques.

a) L'environnement

Cette caractéristique représente tous les critères qui s'imposent au cycliste. Il est donc difficile d'agir directement sur ces critères pour minimiser leur impact dans la quantité d'effort à fournir.

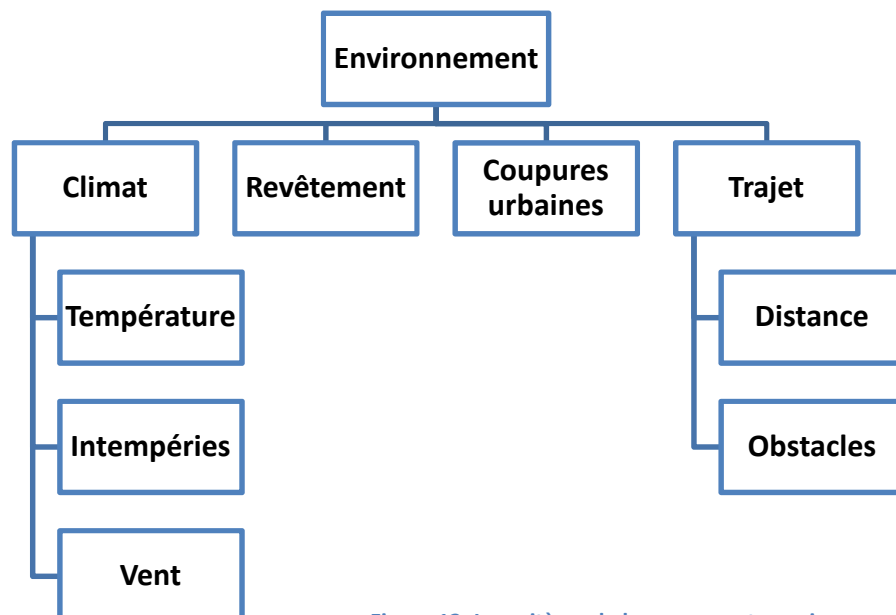


Figure 12: Les critères de la composante environnement

Réalisation : Simon LAPORTE

L'organigramme précédent nous montre qu'il existe un ensemble de critères et sous critères qui entrent en jeu dans le paramètre environnement de l'effort.

Le facteur température a une influence moindre sur les performances physiques dans la mesure où nous sommes en climat tempéré. Sur un territoire d'étude comme Tours on peut dire que sauf conditions exceptionnelles la température n'est pas un réel obstacle à la pratique du vélo d'un point de vue physiologique.

Cependant il est difficile d'avoir envie de prendre son vélo en plein hiver alors que la voiture ou le transport en commun dispose d'un chauffage, d'autant plus que le froid devient plus mordant en fonction de la vitesse de déplacement. Une descente, dans ces conditions devient une contrainte pour le cycliste.

Par forte chaleur c'est l'inverse, une montée sera un obstacle d'autant plus important car l'effort à fournir sera plus conséquent et entraînera d'autres réactions physiologiques (transpiration) peu agréables constituant des freins à la pratique du vélo.

De plus ces facteurs seront plus ou moins dissuasifs suivant le profil du cycliste.¹

Enfin la seule véritable possibilité d'action reste la tenue vestimentaire du cycliste adaptée en fonction des conditions climatiques de manière à minimiser les effets du froid, de la chaleur ou de la pluie.

On remarque déjà que les facteurs liés à l'effort interagissent les uns par rapport aux autres et il semble très difficile de parvenir à formaliser ces interactions.

Concernant le revêtement on a vu lors de l'approche mécanique de l'effort que les forces de frottements contribuent à la quantité d'effort à investir dans la tâche, ces forces de frottement étant liées non seulement aux roues (taille, pneus) mais aussi à la rugosité du sol. Ainsi le type de revêtement doit théoriquement être pris en compte. Toutefois on trouve rarement un réseau routier ou cyclable avec un revêtement inadapté (nous verrons dans le paragraphe suivant que des critères seront écartés en vue de la réalisation du modèle, celui-ci en fait partie).

Les coupures urbaines sont l'ensemble des éléments qui provoquent l'arrêt du cycliste (nécessitant un surcoût en termes d'effort). Il peut s'agir de feux tricolores, stop et autres céder le passage.

Du point de vue de l'aménagement il est possible de limiter leur impact, on peut citer l'exemple de feux clignotants réservés aux cyclistes sur l'avenue Grandmont à Tours. Les automobilistes ont le feu rouge et les cyclistes ont le droit de passer avec prudence en toute légalité.

¹ Il existe selon une étude de l'ADEME en 2004 différents types de cyclistes, on distingue notamment, le flâneur, le pragmatique, le rationnel, l'économe, le sportif...chacun de ces profils étant l'objet de motivations distinctes et plus ou moins fortes.

Enfin le critère obstacles relatif au trajet du cycliste prend en compte le nombre et le pourcentage des pentes à gravir. Il s'agit d'un critère primordial ayant un impact très important sur l'effort à fournir.

b) La tâche

Cette partie de l'effort concerne les conditions matérielles de l'exercice ainsi que l'objectif fixé. Il s'agit donc de savoir de quel vélo ou type de vélo dispose l'utilisateur ou encore quelles sont ces contraintes en matière de vitesse, d'horaires ou de chargement (sac à dos).

1

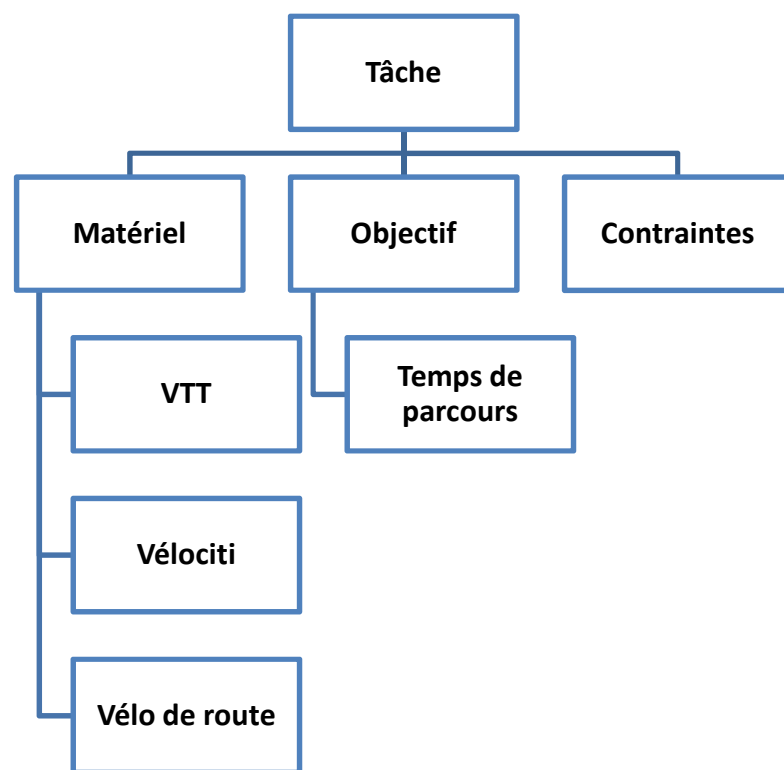


Figure 13: Les critères liés à la composante tâche

Réalisation : Simon LAPORTE

Le type de matériel a une influence sur l'effort car son poids, ses différents braquets, ses pneus ou encore la position aérodynamique du cycliste sont autant de paramètres qui peuvent augmenter ou diminuer la dépense énergétique liée au trajet.

Le temps de parcours réalisé par un cycliste est un élément qui est également à la fois très influent sur l'effort et impossible à prévoir. **On peut toutefois se baser sur des vitesses moyennes et ainsi faire des approximations sur le résultat.**

¹ Le vélociti est le vélo loué par la ville de Tours. (<http://www.velociti.fr/>)

c) L'individu

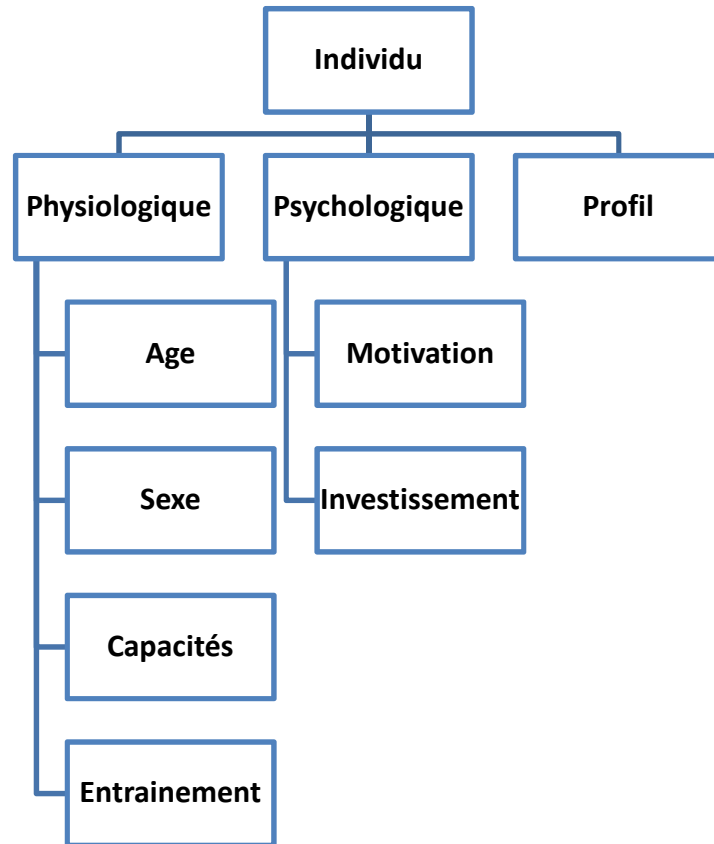


Figure 14: Les critères liés à la composante individu

Réalisation : Simon LAPORTE

On largement pu constater que l'effort est individualisé, propre à chacun en fonction de ses qualité physiques, de son âge, son sexe, son entraînement...

Cela dépend également de sa pratique du vélo, utilise t-il fréquemment le vélo ? Est-ce par choix ? Par conviction écologiques ? Pour gagner du temps ? Voilà autant de renseignements qu'il faudrait avoir pour établir un véritable profil du cycliste et ainsi mesurer quel est pour lui la pénibilité (ou non) qu'implique le vélo comme mode de transport.

Il faut également savoir quel est le maximum subjectif¹ de l'individu pour pouvoir évaluer correctement la difficulté de tel ou tel trajet par rapport à sa propre perception. La méthode serait d'appliquer le protocole de G. Borg afin de coter la difficulté.

¹ Voir Partie 1 paragraphe 32

23. Les limites de cette approche

Cette approche théorique a pour objectif de donner une vision complète des critères à considérer pour modéliser l'effort. Cependant l'objectif de ce rapport est de proposer un modèle qui puisse être testé et mis en place rapidement par rapport au temps imparti à cette étude. Il faut également que le modèle soit viable sur internet en termes de rapidité de calcul notamment.

La première contrainte est le recueil et le traitement des données, en effet on veut pouvoir étendre le modèle à d'autres agglomérations (en plus de Tours, Paris et Nantes) et utiliser d'autres interfaces (téléphone portable, GPS...) il faut donc pouvoir assurer la création d'une base de donnée rapidement.

Comme l'effort est un concept relatif à l'individu il faudra faire des approximations en faisant des regroupements, en créant des catégories.

On ne peut pas imaginer proposer un modèle qui nécessite de prendre trop de temps pour renseigner des champs sur leurs aptitudes, leur profil...(en supposant que les réponses soient connues !)

Il s'agit de faire évoluer cette méthode théorique pour arriver à ne retenir que les critères qui sont les plus significatifs.

24. Une vision plus pragmatique

Afin de pouvoir réaliser le modèle et le tester sur internet nous avons donc abandonné certains critères pour les raisons citées dans le paragraphe précédent. Cette vision sera donc plus modeste et ne retiendra que quelques critères parmi les trois composantes du comportement moteur qui ont cependant un rôle important dans la détermination de l'effort.

Nous retiendrons donc la pente car c'est le principal obstacle à la pratique du vélo sur le territoire choisi.¹(notamment pour les liaisons Tours Centre/Tours Sud ou Tours Centre/Tours Nord) Il est donc intéressant de pouvoir intégrer ce critère à la difficulté d'un parcours. Pour la collecte des données nous utiliserons la base STRM mentionnée dans le paragraphe 31, il suffit d'affecter à chaque nœud la valeur de l'altitude correspondante, on obtiendra alors la pente.

La distance est également un élément qui doit obligatoirement être pris en compte car c'est une des caractéristique principale du trajet, de plus on ne peut pas parler de pente si elle n'est pas associée à la distance correspondante. De plus c'est une donnée dont on dispose déjà car elle est utilisée dans Géovélo.

¹ Rappelons que la pratique du vélo n'est pas forcément liée à la topographie d'un territoire, on trouve, selon N. Pressicaud des villes cyclables alors que leur topographie n'est pas favorable. Il s'agit une nouvelle fois de perception de l'effort et d'habitude pour que le vélo prenne plus de place dans nos agglomérations.

Ensuite nous conserverons les critères qui se rapportent à l'individu pour arriver à un modèle de l'effort personnalisé et ne pas faire une simple classification d'itinéraires que chacun s'approprie.¹ Le problème étant de ne pas trop contraindre l'utilisateur en lui demandant une quantité importante d'informations sur lui. Sachant qu'il faut saisir ces informations à chaque utilisation.

Le matériel peut figurer parmi les critères à condition de ne pas trop détailler la gamme des vélos, les 3 propositions à ce sujet dans l'approche théorique seront conservées.

La distinction homme/femme peut également être prise en compte ainsi que l'âge car les réponses sont évidentes et tout à fait objectives contrairement à une question sur le niveau d'aptitudes physiques.

Cependant il serait intéressant d'arriver à intégrer un critère sur les aptitudes physiques, pour cette approche pragmatique on considèrera qu'un individu entraîné aura tendance à minimiser le résultat de l'effort sur le parcours alors que la personne non-entraînée maximisera le résultat.

Les autres critères étant trop subjectifs, n'étant pas assez importants dans la détermination de l'effort ou suscitant des problèmes de données seront écartés du premier modèle de l'effort.

Voici la synthèse des critères retenus pour cette approche :

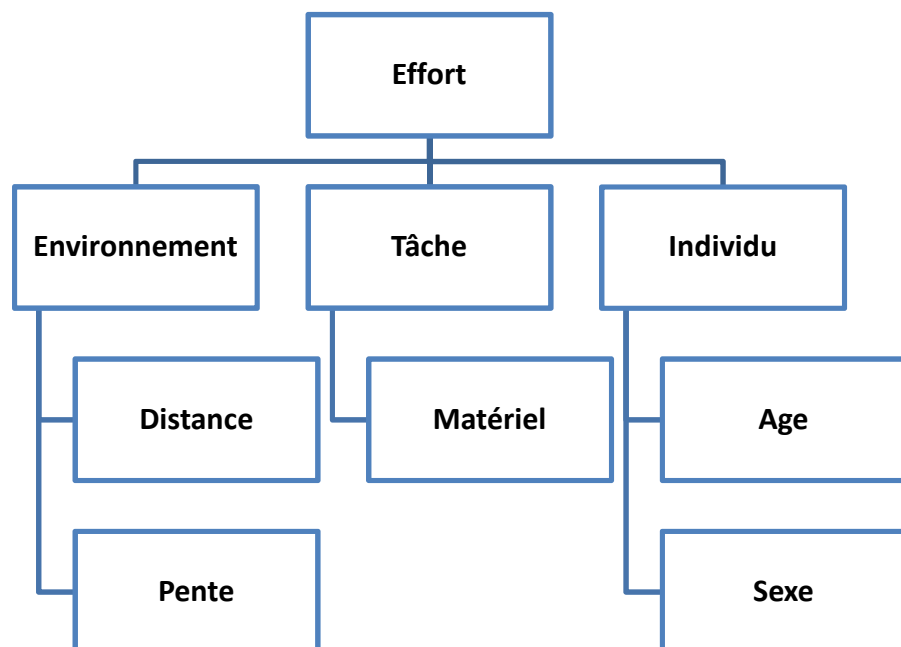


Figure 15: Approche pragmatique de l'effort

Réalisation : Simon LAPORTE

¹ On pense par exemple au classement des pistes de ski (vert, bleu, rouge, noir) en fonction de la difficulté. Ce classement étant donné à l'appréciation des pisteurs selon des critères tels que le dénivelé, l'état de la neige, la longueur de piste...

Synthèse de la partie 2

On a vu dans cette partie que le modèle de l'effort sera expérimenté sur la ville de Tours qui bénéficie d'un modèle de calcul d'itinéraires cyclables. On dispose donc des données déjà mobilisées pour Géovélo, de plus Tours peut être le lieu d'expérimentations du futur modèle de l'effort.

On a également posé le problème des données, de leur collecte, traitement, exploitation et mise à jour.

Nous avons également abordé deux types d'approches, l'une théorique qui tente de détailler les critères qualifiant l'effort, puis une autre approche plus pragmatique.

La seconde approche tient compte des contraintes liées à Géovélo et à son type de programmation. On retrouve ainsi quelques critères mais on a dû en abandonner certains, regrouper d'autres pour pouvoir ensuite tenter, dans la dernière partie de ce rapport, de les assembler mathématiquement.

Il existe déjà une première approximation dans la détermination de l'effort d'un point de vue théorique. Dans la mesure où cette approche n'est pas une liste exhaustive¹ de critères mais tente de garder ceux qui semblent les plus significatifs.

Essayons maintenant d'appliquer concrètement à Géovélo les résultats obtenus par l'approche pragmatique du paragraphe 34.

L'objectif de la modélisation de l'effort dans Géovélo est d'une part de donner une information sur la difficulté d'un parcours et d'autre part de calculer des itinéraires suivant ce critère afin de simplifier le trajet dans la mesure du possible.

¹ On peut citer des critères tels que le bon usage des vitesses du vélo, l'orientation du vent, la qualité du vélo, s'il possède des cales pieds...

PARTIE 3
VERS UNE MODELISATION DE
L'EFFORT

Il s'agit dans cette partie de trouver comment agencer l'ensemble des critères vus dans la partie précédente entre eux et de proposer une analyse multicritère pour intégrer la notion d'effort à Géovélo.

1. Le partenariat avec le département informatique

Afin de développer un modèle qui puisse être opérationnel dans le temps imparti, il semble intéressant de se tourner vers les futurs ingénieurs en informatique qui peuvent dans le cadre de leur PFE (projet de fin d'études) contribuer à la réalisation du modèle.

11. Les contraintes à respecter

Le travail avec un étudiant du département informatique dans le cadre de son PFE suppose que le travail apporté au modèle puisse répondre aux attentes et exigences pédagogiques en matière d'informatique.

Ainsi la partie réflexion sur le concept d'effort à vélo, d'élaboration de critères relève plutôt de la compétence du département aménagement à travers ce présent rapport. La mise en application des formules, en tenant compte des données disponibles gratuitement, et donc de l'algorithme relève de la compétence de M. Shang Ke¹.

Lors de la mise en place de l'algorithme on se rend compte que certains concepts théoriques doivent être soit abandonnés, soit modifiés au profit d'une application concrète.

Par exemple il est difficile d'intégrer la notion de coupure urbaine² à Géovélo. Ce critère suppose de connaître précisément où sont ces coupures sur le terrain puis dans un deuxième temps de savoir quel est le type de coupure car un stop et un sens giratoire ne représentent pas le même arrêt. De plus la mise à jour de ce type de données demeure un obstacle à la modélisation.

¹ Elève ingénieur en informatique ayant participé à la réalisation du modèle dans le cadre de son PFE

² Voir figure 12 dans le paragraphe 32 de la partie 2.

12. Le principe de fonctionnement de Géovélo et du modèle

Géovélo, comme on a pu le voir dans le paragraphe 22 de la seconde partie de ce rapport, fonctionne suivant le principe de l'algorithme de Dijkstra.

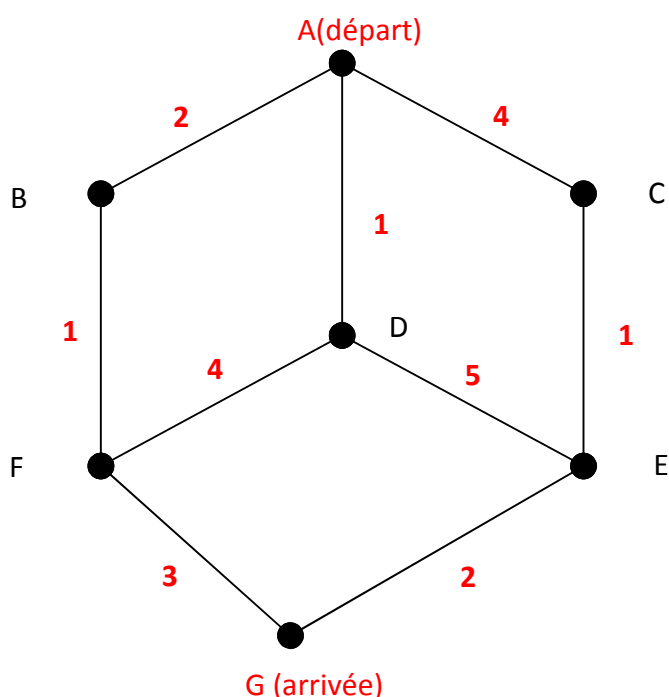
Il s'agit de représenter le réseau routier par un graphe composé d'arcs et de nœuds, les données étant affectées à l'une ou l'autre de ces entités.

Le principe de l'algorithme est de partir d'un nœud, d'évaluer l'ensemble de ces fils et de choisir la valeur du critère évalué la plus faible, ensuite on poursuit jusqu'à ce que la valeur soit supérieure à celle d'un autre fils du point de départ et ainsi de suite. On comprend mieux ce principe sur le schéma suivant.

L'exemple simplifié suivant représente une partie d'un réseau routier, chaque valeur attribuée sur les arcs correspond au coût correspondant à la valeur de l'effort¹, il s'agit pour le moment de valeurs totalement arbitraires servant d'illustration.

Le rouge sert à montrer la logique suivie par l'algorithme.

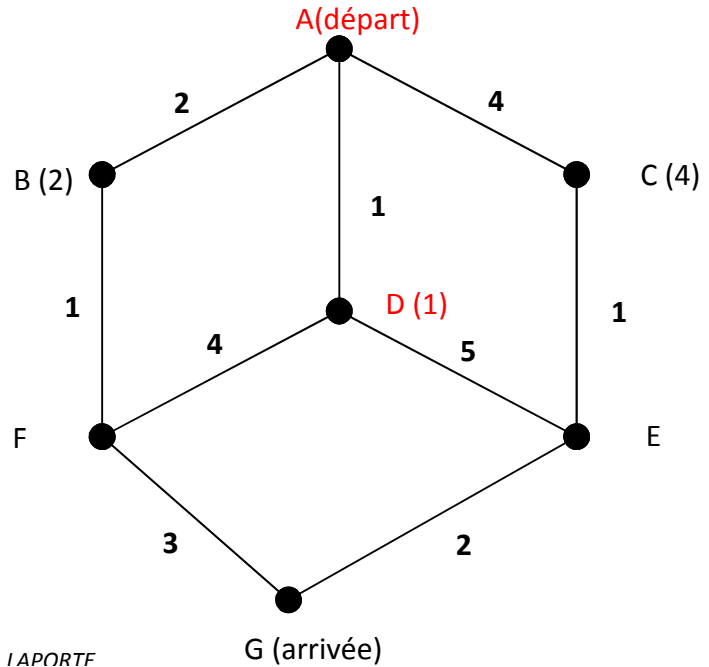
- Etape 1 : Attribuer un « coût effort » pour chaque arc et définir un point de départ puis d'arrivée



Réalisation : Simon LAPORTE

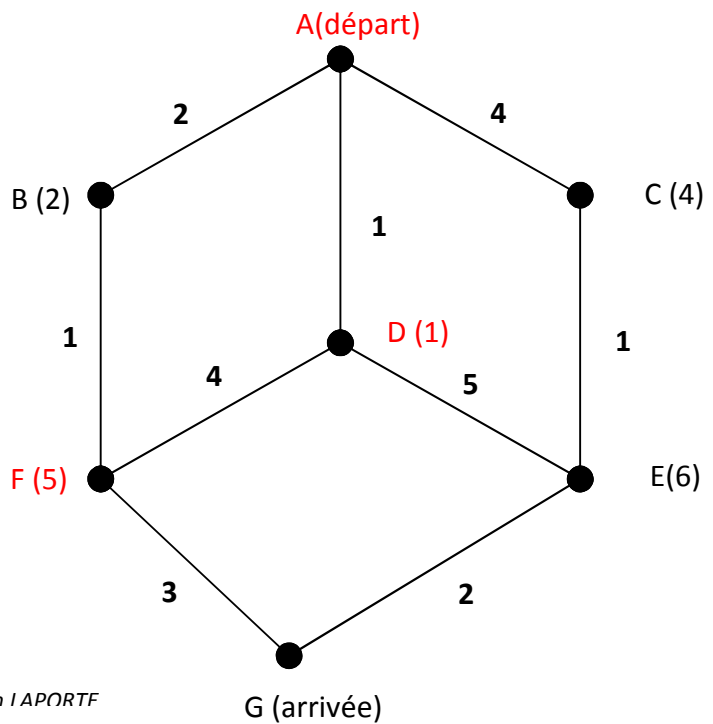
¹ Plus la valeur est importante, plus l'arc où le tronçon de route est difficile.

- Etape 2: Attribuer aux fils du point A la valeur des arcs correspondant puis privilégier le fils ayant la plus faible valeur. Lors de cette première étape on choisi alors le point D.



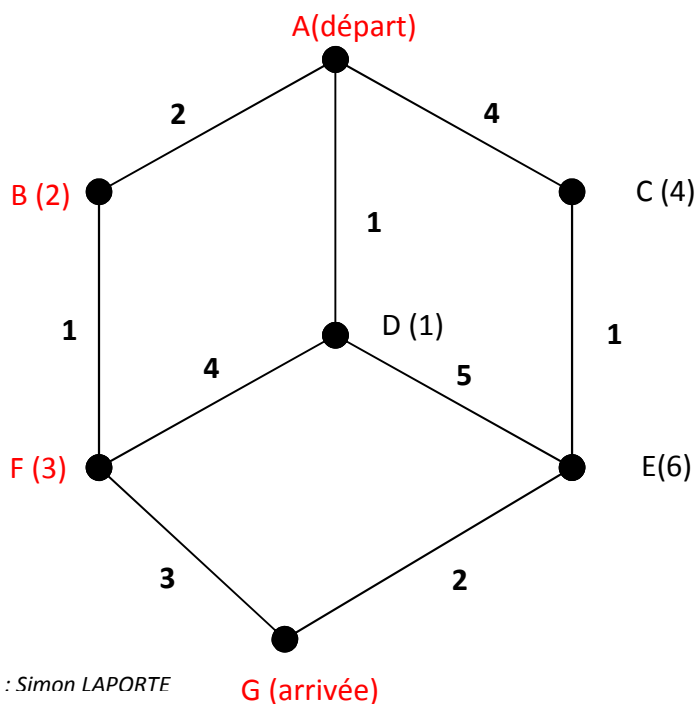
Réalisation : Simon LAPORTE

- Etape 3 : On répète le processus de l'étape 1 et on arrive au point F



Réalisation : Simon LAPORTE

- Etape 4 : La valeur au point F étant de 5 on repart au point A et on évalue le chemin en passant par B (2). On arrive finalement en G avec une valeur globale de 6.



- Etape 5 : Il s'agit de vérifier que le chemin en passant par C est plus coûteux et donc plus difficile pour confirmer que le chemin ABFG est bien le bon résultat.

A ce stade on peut remettre en cause le principe utilisé par Géovélo, est-ce le meilleur moyen de calculer un itinéraire ? Existe-t-il une autre méthode qui intégrerait plus de critères ? Ces questions peuvent faire l'objet d'une étude dans le domaine informatique.

Conservons pourtant le modèle Géovélo comme référence dans la suite de ce rapport.

Il s'agit de se poser la question de la valeur que l'on attribue à chacun de ses arcs. Ce coût est le résultat de la combinaison des critères vus précédemment. Une première remarque est que le coût attribué à chaque arc est variable en fonction de l'utilisateur, des conditions météo, de l'âge de la personne...

13. Un premier classement des critères entre eux

Dans un premier temps la méthode consiste à détailler les différentes classes de chaque critère. Nous avons dans l'approche pragmatique conservé les critères suivants :

- Matériel
- Age
- Sexe
- Distance
- Pente

Détaillons l'ensemble de ces critères puis essayons de hiérarchiser ces critères.

a) Matériel¹

D'après la figure 13 nous avons vu que le problème est ramené à 3 types de vélos. On considère que le vélo de route est le plus léger avec des pneus fins, c'est donc le moins « coûteux » en matière d'efforts. Le VTT, plus lourd avec de plus gros pneus, reste cependant préférable par rapport au vélo city, lourd et ne disposant pas d'un dérailleur élaboré.

Matériel	Valeur²
Vélo route	20
VTT	30
Vélociti	40

Tableau 1: Valeur des critères liés au matériel

b) Age

Les aptitudes physiques augmentent de l'enfance à l'âge adulte avant de diminuer à nouveau avec le vieillissement de l'organisme.

Les classes d'âge proposées ne tiennent pas compte de l'entraînement des personnes, en effet notamment à partir de 50 ans les différences peuvent être importantes suivant le niveau de pratique physique quotidienne.

¹ Il est possible d'avoir une liste plus détaillée concernant cet aspect matériel si l'on tient compte de l'ensemble de la gamme vélo, assisté électriquement ou non, suivant la qualité et donc indirectement le prix.

² Les valeurs proposées à ce stade seront justifiées dans le paragraphe 3 de cette partie

Age	Valeur
14-16	0,9
16-25	0,95
25-35	1
35-45	0,95
45-55	0,9
55-65	0,85
65 et +	0,7

Tableau 2: Valeur des critères liés à l'âge

c) Sexe

Ici deux solutions possibles!

Sexe	Valeur
Femme	20
Homme	10

Tableau 3: Valeur des critères liés au sexe

d) Distance

Cette donnée est déjà utilisée dans Géovélo, c'est une valeur fixe exprimée en mètres qui est renseignée pour chaque arc du graphe. On peut travailler avec les distances directement ou affecter des valeurs plus arbitraires en fonction de la distance. Par exemple on attribue la valeur 1 entre 0 et 100m puis 2 entre 100 et 150m...Mais cela comporte l'inconvénient d'alourdir le calcul nous travaillerons donc avec les valeurs réelles de la distance.

e) Pente

La pente est l'élément le plus important à prendre en compte dans l'effort. En effet, c'est le critère le moins intuitif. Une personne quelque soit son âge ou son sexe peut arriver en fonction de la distance si elle est capable de réaliser le parcours. Cependant la pente peut être un véritable obstacle à la pratique du vélo.

En pratique on observe trois types de comportements :

- La personne est en bonne forme et elle franchit l'obstacle sur sa selle,
- La personne descend de son vélo pour franchir l'obstacle,
- La personne n'utilise pas son vélo à cause de l'obstacle.

Nous disposons des données relatives aux altitudes en chaque nœud du graphe avec une précision qui parfois n'est pas optimale puisque les relevés sont tous les 90m environ. Cependant le fait d'avoir les altitudes par nœud nous permet de faire le calcul de pente en tenant compte du sens de parcours et donc on peut déterminer si le tronçon est une montée ou une descente.

Compte tenu des résultats obtenus lors de la première partie, les différentes approches de l'effort (physiologique, psychologique, mécanique) semblent confirmer que de manière générale il vaut mieux privilégier une pente longue à faible pourcentage qu'une pente courte à fort pourcentage.

Cette proposition étant vraie dans la mesure où la distance parcourue reste comparable, il ne s'agit pas de doubler la distance du trajet pour éviter une petite pente à fort pourcentage. Rappelons que le cycliste urbain fait souvent le choix du vélo pour le gain de temps qu'il peut représenter. L'itinéraire proposé par le modèle doit donc rester pertinent.

2. Les types de trajets possibles

Essayons maintenant d'appliquer ces données au terrain d'étude pour mieux appréhender le problème de la relation numérique entre les différents critères. Dans un premier temps nous allons essayer de décrire l'ensemble des possibilités en termes d'enchaînement des types de tronçons.

21. Les arcs du graphe

On se ramène à une vision simplifiée du graphe, isolons trois cas possibles pour les arcs.



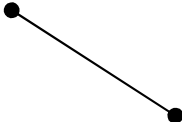
Arcs	Descriptif	Caractéristiques
	<p>L'arc est une portion de plat.</p> <p>L'effort sera principalement lié à la distance.</p>	<p>Distance</p> <p>Pente = 0</p>
	<p>Il s'agit d'une montée.</p> <p>L'effort est lié à la force gravitationnelle et donc au pourcentage de la pente</p>	<p>Distance</p> <p>Pente > 0</p>
	<p>La descente permet de se déplacer sans efforts à priori, mis à part la concentration.</p>	<p>Distance</p> <p>Pente < 0</p>

Tableau 4: Les différents types d'arcs

Réalisation : Simon LAPORTE

22. Quels enchaînements possibles ?

Il existe 9 combinaisons possibles de ces 3 arcs :

- Montée-montée
- Montée-plat
- Montée-descente
- Plat-plat
- Plat-montée
- Plat-descente
- Descente-descente
- Descente-plat
- Descente-montée

On considère alors un trajet comme étant un enchaînement de ces combinaisons. On peut évaluer intuitivement l'impact de l'ordre de ces arcs.

Prenons l'exemple d'une montée, si elle est précédée d'un arc plat on peut considérer qu'elle engendre un certain effort notons le E.

Si cette même montée est précédée d'une descente on peut facilement dire que l'élan de la descente va minimiser l'effort de la pente, alors on a un nouvel effort pour la pente que l'on note $E-X_1$ (avec $X_1 > 0$).

Enfin si cette montée est précédée d'une autre montée l'effort sera d'autant plus difficile car il y aura une accumulation de fatigue. Le nouvel effort lié à la montée est noté $E+X_2$ (avec $X_2 > 0$).

On peut ainsi arriver à un classement de l'effort nécessaire pour parcourir un arc en fonction de l'arc précédent.

De plus si on considère un trajet dans sa globalité on ne doit pas s'arrêter à l'enchaînement de deux arcs mais plutôt à la position d'un arc dans le parcours. C'est-à-dire considérer qu'une pente sera plus difficile en fin qu'en début de trajet à cause de la fatigue accumulée.

Cependant on peut opposer deux limites quand à la modélisation de ce concept :

- L'enchaînement des arcs sur le graphe (pour l'algorithme) se fait sans tenir compte ni de la circulation, ni de la morphologie, ni des coupures du réseau.
En pratique il n'est pas rare de trouver un stop à l'issue d'une descente ce qui annule l'effet « d'entraînement » pour le tronçon suivant. On peut également citer l'exemple de la descente qui aboutit sur un angle droit pour poursuivre l'itinéraire. Il est obligatoire de freiner et donc de perdre à nouveau le bénéfice de la descente.

- L'effet fatigue est limité par le fait que l'on se concentre sur un territoire d'étude comme Tours avec des pratique urbaines et non sportives du vélo.

Ainsi nous ne tiendrons pas compte dans ce modèle, pour les raisons précédentes, de l'influence de l'enchaînement des arcs.

3. Comment générer le calcul ?

Cette partie a pour objectif d'utiliser les critères que l'on a sélectionnés pour parvenir à les assembler en vue d'une modélisation. Le but est d'arriver à justifier les opérateurs qui les lient et de soumettre le modèle à des tests afin de vérifier sa pertinence.

La création du modèle sera inspirée des résultats cités précédemment. Il devra être cohérent avec les approches théoriques présentées dans la première partie du rapport.

31.Elaboration de la formule

Pour concevoir la formule qui calculera la valeur de l'effort, il faut distinguer les critères entre eux. On a d'une part les critères qui ne sont pas connus de l'utilisateur, propres au trajet et d'autre part les critères renseignés par la personne.

Essayons de raisonner à partir des rapports obtenus dans l'approche mécanique. Le principe est de vérifier par exemple qu'une pente de 10% nécessite deux fois plus d'effort qu'une pente à 5%.

Est-ce que 10km sur le plat sont équivalents à 5km avec de fortes pentes ? Le modèle devra pouvoir répondre à ce genre de question, nous vérifierons ainsi critère après critère si la façon de les combiner reste pertinente.

a) Les critères « pente » et « distance »

Ces deux critères sont relatifs au trajet, ce sont sur ces deux là que l'algorithme va appliquer la méthode de Dijkstra.

Imaginons le trajet suivant (très court) pour comprendre le fonctionnement et l'application de la formule sur un itinéraire donné.

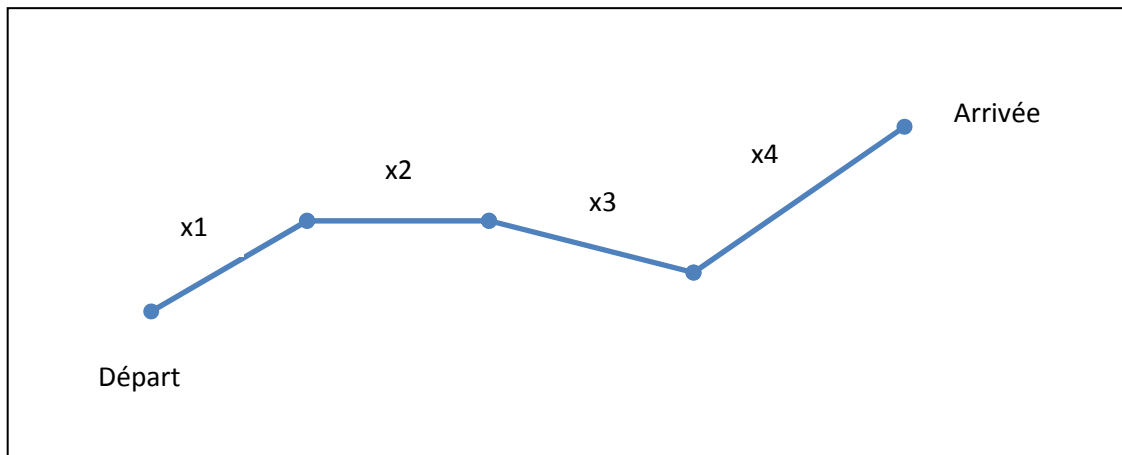


Figure 16: Le calcul de l'effort sur un trajet

Réalisation : Simon Laporte

Les x_i représentent la valeur correspondant à l'effort sur un arc, on a alors la valeur globale de l'effort correspondant au trajet notée X avec :

$$X = \sum_{i=1}^n x_i$$

On peut définir chaque arc par sa pente (puisque l'on connaît à priori les altitudes à chaque nœud) on peut alors affecter cette valeur à l'arc.

Mais on ne peut pas considérer un arc de 10m à 5% comme un arc de 100m à 5%. On peut donc multiplier entre eux ces critères. (L'addition rendant le critère « pente » négligeable par rapport à la distance)

Soit
$$x_i = p_i \times D_i$$

Après mise en pratique de cette première formule on se rend compte de deux problèmes majeurs :

- Comment gérer les descentes ?
- Si la pente est comprise entre 0 et 1 alors la valeur de l'effort est plus faible que si on ne considère que la distance.

On peut résoudre le problème en introduisant une conditionnelle dans l'algorithme, c'est-à-dire dès que la pente est comprise entre -1% et 0% on considère que la pente est nulle. Si la pente est inférieure à -1% alors on compte une valeur nulle sur l'arc ($x_i=0$). En effet l'effort lors d'une descente est considéré comme étant négligeable.

Ensuite pour éviter qu'il y ait des incohérences avec les valeurs inférieures à 1% de pente. On propose la formule suivante :

$$x_i = (p_i + 1) \times D_i$$

D'où :

$$X = \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n (p_i + 1) D_i$$

Avec

X la valeur de l'effort sur tout le trajet

x_i la valeur de l'effort de l'arc i

p_i la pente de l'arc i en %

D_i la distance de l'arc i en m

On peut vérifier la pertinence des résultats à l'aide d'un tableau à double entrée donnant les différentes valeurs des x_i en fonction de p_i et D_i

p_i/D_i	40	50	60	70	80	90	100
0	40	50	60	70	80	90	100
1	80	100	120	140	160	180	200
2	120	150	180	210	240	270	300
3	160	200	240	280	320	360	400
4	200	250	300	350	400	450	500
5	240	300	360	420	480	540	600
6	280	350	420	490	560	630	700
7	320	400	480	560	640	720	800
8	360	450	540	630	720	810	900
9	400	500	600	700	800	900	1000
10	440	550	660	770	880	990	1100
11	480	600	720	840	960	1080	1200
12	520	650	780	910	1040	1170	1300
13	560	700	840	980	1120	1260	1400
14	600	750	900	1050	1200	1350	1500
15	640	800	960	1120	1280	1440	1600

Tableau 5: Valeur des critères pente et distance

Réalisation : Simon Laporte

On remarque en lisant le tableau (cellules surlignées) que 60m à 11% nécessitent autant d'efforts que 90m à 7%.

Sur le plat (première ligne du tableau) seule la distance compose la valeur de l'effort.

b) Les critères renseignés par le cycliste.

Ce type de critère qui peut être complété avec des critères mentionnés lors de l'approche pragmatique, va apporter une personnalisation de l'effort. Cela correspond aux résultats théoriques que nous avons obtenu (rappel : l'effort est une notion subjective relative à l'individu).

Ainsi nous nous concentrons plus particulièrement sur l'influence du matériel, de l'âge et du sexe du cycliste pour affiner le résultat de l'effort.

Ces données doivent-elles s'exprimer sur chacun des arcs ? Doit-on ajouter ou retrancher une valeur par rapport au résultat global ? (obtenu en appliquant la méthode du paragraphe précédent)

A priori une personne désavantagée par son âge le reste sur tout le trajet, chacun des arcs sera alors plus difficile à parcourir, cependant la descente doit rester un effort quasi négligeable et la montée doit être comptée comme une difficulté supplémentaire. Donc la différence relative à l'âge ne s'exprime pas de façon proportionnelle sur tout le trajet. On rapporte donc ce critère à la pente, il ne s'exprimera pas sur le plat et en descente. Nous utiliserons donc la division en veillant à ne jamais utiliser de valeurs nulles.

Matériel et sexe peuvent être considérés comme des valeurs s'appliquant à l'ensemble du trajet de manière uniforme, quel que soit le type d'arc.

Cependant il faut que l'influence de ces critères reste la même en fonction de la longueur du trajet.

Si la distance est de 5km avec des pentes, la valeur relative à l'effort sera grande, il faut donc que la valeur relative au sexe ou au matériel le soit également.

Ainsi nous calculerons ces critères à l'aide d'un pourcentage de la valeur d'effort.¹

Avec les notations de la figure précédente on a

$$\text{Effort} = X + \left(\frac{\text{Matériel}}{100} X + \frac{\text{Sexe}}{100} X \right) = X \left(1 + \frac{\text{Matériel} + \text{Sexe}}{100} \right)$$

Avec

$$X = \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{\text{Age}} + 1 \right) D_i$$

¹ On retrouve les valeurs relatives au sexe, matériel et âge dans les tableaux du paragraphe 13 de la partie 3

32. Quelques trajets tests

Essayons de tester ce modèle en prenant l'exemple de quelques trajets. L'objectif est simplement d'illustrer la formule, les phases de tests sont réalisées directement sur Géovélo.

Exemple :

Sexe	Matériel	Age	Distance	Dont pente	Pourcentage	Résultat
H	Vélo route	21	5km	0km		6500
F	Vélo route	21	5km	0km		7000
H	Vélociti	21	5km	0km		7500
H	VTT	21	5km	0,5km	5%	10500
H	VTT	21	5km	1km	2%	9800
H	VTT	46	5km	0,5km	5%	10889

On peut à travers ce court exemple montrer que le modèle (colonne résultat) respecte les relations d'ordre établies précédemment.

33. Les limites de ce modèle

Cette formule nous permet de faire une modélisation simplifiée de l'effort, cependant on remarque sur Géovélo que ce critère se confond parfois avec la distance ce qui semble contrarier les ingénieurs informatique qui souhaitent voir l'influence de ce critère. Pourtant on a pu voir que les contraintes du territoire ne permettent pas d'aboutir sur un changement d'itinéraire systématique.

On peut également constater que Géovélo et son système de fonctionnement nous a contraint à abandonner un certain nombre de critères (qui n'étaient déjà pas exhaustifs).

On peut alors se poser la question de l'évaluation de la perte d'information entre le modèle théorique et le modèle pragmatique.

La mise en pratique de ce modèle semble donner des résultats cohérents même si parfois le défaut de précision des altitudes se fait sentir. La pente ayant une part assez importante dans la formule.

4. L'interface du site

Le site expérimental qui a été mis en place est pour le moment la seule interface entre le modèle et l'utilisateur (en attendant une application pour GPS). Il est donc très important d'avoir une réflexion sur l'organisation des informations pour que l'usage soit optimal et que l'outil soit convaincant.

41. La carte interactive

C'est l'élément central, indispensable au principe Géovélo. Cette carte interactive permet de se repérer, à différentes échelles sur le territoire concerné par Géovélo. Son utilisation est assez simple et intuitive. Il est possible de placer directement adresses de départ et d'arrivée sur la carte.

Du point de vue de la légende on distingue dans la version initiale du site, 4 éléments de légende sur le trajet cyclable choisi :

- Piste cyclable
- Bande cyclable
- Aucun aménagement
- Voie à forte circulation

Si l'on se place du point de vue de l'utilisateur, la distinction piste cyclable/bande cyclable n'est pas toujours évidente. On peut donc se ramener à une légende de type « Aménagement cyclable ». La classe « Voie à forte circulation » ne semble pas pertinente dans la mesure où elle peut recouper les deux autres éléments de la légende (Aménagement ou non) et donc avoir un impact très différent, c'est un élément qui pourrait éventuellement apparaître de manière fixe sur la carte.

Enfin la légende doit être suffisamment en vue pour que les usagers ne cherchent pas la signification des différentes couleurs sur la carte.

42. Le choix des critères

Il s'agit pour l'utilisateur de définir le critère qu'il souhaite privilégier pour déterminer son trajet.

Au niveau de la dénomination, « distance » et « sécurité » sont explicites en revanche le terme « effort » ne semble pas approprié, il peut être remplacé par le terme « difficulté ». Il faut ensuite que l'utilisateur puisse clairement faire son choix entre les critères. On peut envisager le système suivant :

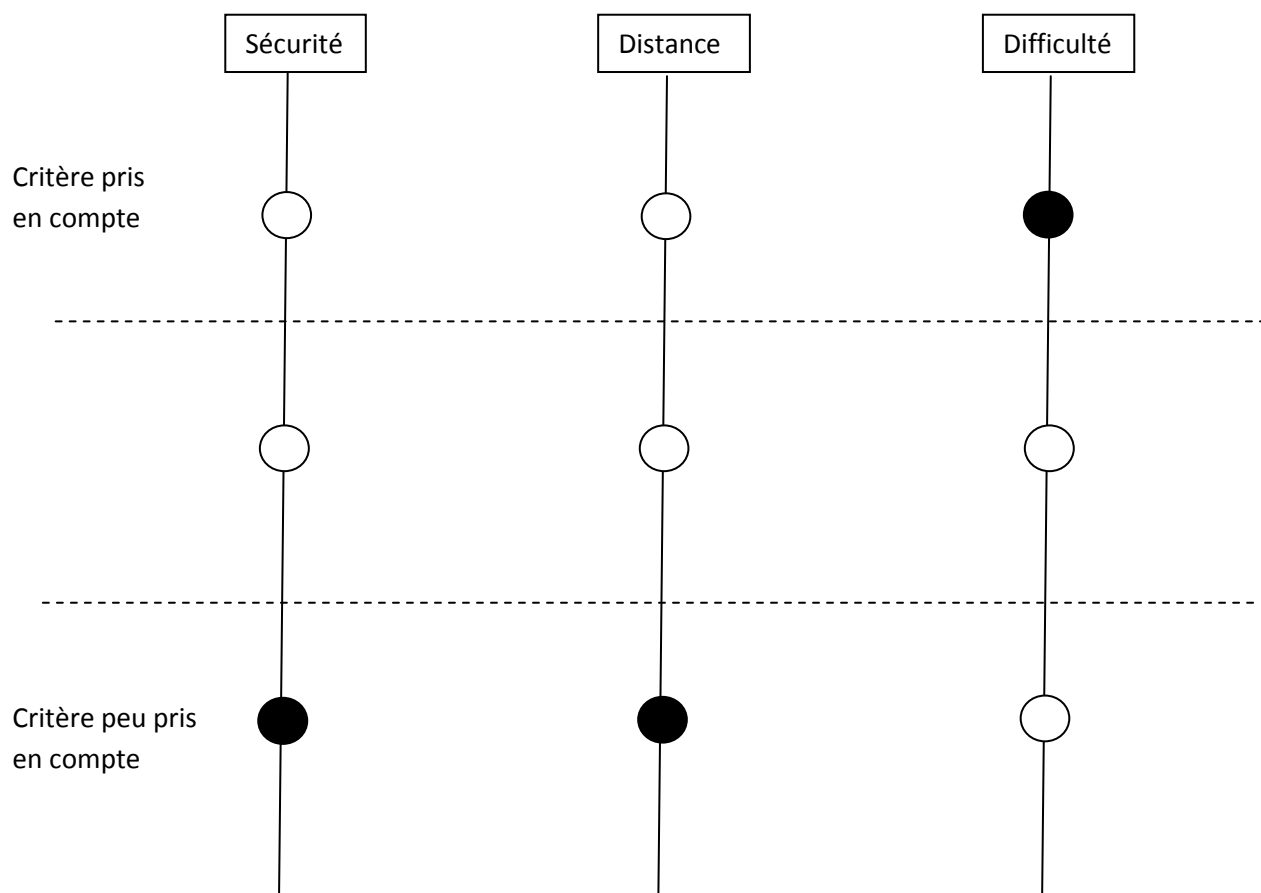


Figure 17: Sélection des critères sur Géovélo

Réalisation : Simon LAPORTE

Dans cette exemple on favorise le critère difficulté, le trajet choisi sera donc le plus « facile » possible entre deux point, ce qui ne sous entend pas forcément que l'itinéraire est différent de celui obtenu par la distance ou la sécurité.

Notons également que la sélection des trois critères donne une solution optimale pour l'ensemble des critères ce qui ne signifie pas une solution optimale pour chaque critère.¹

Enfin l'utilisateur devra définir parmi des réponses prédéfinies son âge, son sexe et le type de matériel qu'il utilise.

¹ Voir la notion optimum de Pareto.

43. Les informations

Le site renseigne l'utilisateur, comme tout bon GPS, sur la distance parcourue et sur le temps de parcours approximatif basé sur une moyenne de 12 à 17 km/h. Il est également intéressant de mentionner et de quantifier la difficulté associée au trajet en fonction de son usager.

Il est pertinent de se ramener à l'échelle de Borg pour évaluer le niveau de difficulté du trajet avec des valeurs nominatives.

Ainsi la précision du calcul n'est utile qu'au calcul de l'itinéraire et le fait d'avoir un nombre fini de classes d'effort permet une meilleure compréhension de la difficulté prévisionnelle d'un trajet.

On obtient alors le tableau suivant :

Valeurs numériques	Valeurs nominatives de la difficulté	Correspondance
< 1800	Très très facile	« Moins de 1km de plat »
<3000	Très facile	« Moins de 3km de plat »
<8000	Facile	« Un peu de plat (3km)avec légères montées »
<11000	Difficile	« Un peu de plat (3km)avec fortes montées »
>11000	Très difficile	« Longue distance (>6km) avec plusieurs montées »

Tableau 6: Les valeurs nominatives de la difficulté

Réalisation : Simon LAPORTE

CONCLUSION

La problématique de cette recherche était de caractériser l'effort en vue d'une modélisation. La méthode utilisée a été d'explorer de façon théorique en mobilisant différentes sciences le concept d'effort

On peut donc dire que c'est bien une notion complexe car elle est très subjective, fait appel au ressenti, mobilise des paramètres tels que la motivation ou l'investissement dans la tâche.

Cependant en l'abordant selon différentes approches on peut constater qu'il existe des indicateurs quantifiables (approche mécanique ou physiologique) et donc plus objectifs. Ils permettent d'assurer une meilleure validation des résultats obtenus par la modélisation.

Le partenariat avec le département informatique a permis de multiplier les compétences au service de la pratique du vélo. Ainsi cette recherche a pu avoir une application concrète sur internet, ce qui a été l'objet de nombreux ajustements pour que le modèle puisse être utilisé sans que le calcul ne prenne trop de temps.

On soulève alors un problème plus général propre à la modélisation. Il s'agit de savoir, si on a le choix, sur quel support mettre en pratique le modèle. En effet ce rapport nous montre que plus on se rapproche d'un modèle pratique plus les contraintes liées à son application augmentent, nécessitant des approximations et adaptations du concept théorique. On peut alors se poser la question de cette perte d'informations, comment l'évaluer, la quantifier ?

Nous avons donc proposé dans ce rapport la construction d'un modèle pratique, qui tient compte des différentes contraintes. Il faut le voir comme le résultat d'une méthode appliquée qui à défaut d'être le reflet de l'effort nous permet de hiérarchiser les itinéraires entre eux pour définir le moins difficile.

Enfin il ne faut pas oublier le thème dans lequel s'inscrit cette recherche : innover en faveur de la mobilité douce. Il faut donc continuer dans ce sens, le GPS pour vélo devient intéressant dans la mesure où il n'est pas une transposition du modèle existant pour les automobilistes mais un réel outil pour les vélos en tenant compte de leurs attentes et leurs contraintes (telle qu'une topographie défavorable). C'est-à-dire en considérant le vélo comme un mode de transport à part entière.

BIBLIOGRAPHIE

- BORG G. (1998), *Borg's perceived exertion and pain scales*, Human kinetics, 104p.
- CARRE J-R. (2003), *Écomobilité : Les déplacements non motorisés :marche, vélo, roller...,éléments clés pour une alternative en matière de mobilité urbain* ,INRETS, 77p.
- DELIGNIERES D. (2000), *L'effort*, Paris, Revue EPS, 127p.
- FOURNIER J-C. (2006), *Théorie des graphes et applications*, Lavoisier, 288 p.
- GERBER C. (2009), *Les déplacement en vélo dans la ville:la question de la sécurité*, Projet de fin d'études Polytech'Tours, 63p.
- LAMENDIN H. et COURTEIX D. (1995), *Biologie et pratique sportive*, Paris, Masson, 126p.
- LANQUAR L. (dir) (2004), *Vers une pratique quotidienne du vélo en ville*, ADEME, 132p.
- LE SCNAFF C., LEGRAND F. (2004), *Psychologie*, Paris, Ellipses, 143p.
- MONOD H. (2007), *Physiologie du sport*, Elsevier Masson, 289p.
- PAPON F. (2007), *Quelle place pour le vélo dans la recherche ?* ,Vélocité n°93 pp20-21.
- PAQUOT T.(juin 2009), *Dossier : A Bicyclette*, revue urbanisme n°366, 34p.
- PFISTER G. (1988), *L'effort sportif : « Eléments méthodologiques et théoriques pour une approche clinique »*, Marseille, Revue STAPS, 20 p.
- PRESSICAUD N. (2009), *Le vélo à la reconquête des villes*, L'harmattan, 352p.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la difficulté de l'exercice	15
Figure 2: Evolution de la VO2max avec le temps	17
Figure 3 Représentation de l'effort investi.....	20
Figure 4: Relation entre effort et difficulté perçue	22
Figure 5 La force de résistance aérodynamique	25
Figure 6 La force de frottement	26
Figure 7 Influence de la pente sur l'effort.....	28
Figure 8 Effort à fournir en fonction de la pente et de la vitesse	29
Figure 9 Rapport puissance fréquence cardiaque.....	30
Figure 10: Chemin de contournement	38
Figure 11: Composantes du comportement moteur	42
Figure 12: Les critères de la composante environnement	42
Figure 13: Les critères liés à la composante tâche	44
Figure 14: Les critères liés à la composante individu	45
Figure 15: Approche pragmatique de l'effort	47
Figure 16: Le calcul de l'effort sur un trajet	61
Figure 17: Sélection des critères sur Géovélo	66

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1: Topographie de Tours.....	37
Illustration 2: Exemple du décalage entre le modèle et la réalité sur Géovélo	40

TABLE DES MATIERES

Avertissement.....	4
Formation par la recherche et projet de fin d'études	5
Remerciements.....	6
Sommaire.	8
Introduction	10
Partie 1.....	12
Comment définir la notion d'effort ?.....	12
1. Approche étymologique.....	13
2. L'effort, aspects physiologiques	14
21. Les sources d'énergie	14
22. Le rôle du cœur et fréquence cardiaque.....	15
23. Les effets du vieillissement sur la performance.....	17
24. La différence hommes/femmes face à l'effort.....	18
3. L'effort, aspects psychologiques	20
31. L'investissement dans la tâche.....	20
32. La difficulté perçue	21
4. Du point de vue de la mécanique.....	24
41. Les résistances aérodynamiques.....	24
42. Les forces de frottements	26
43. La force gravitationnelle.....	27
44. Une formule globale.....	29
PARTIE 2.....	34
Quels sont les critères à retenir pour caractériser l'effort ?.....	34
1. Le choix de Tours comme territoire d'étude	35
11. Un territoire connu où une expérimentation est possible.....	35
12. Un modèle existant : Géovélo	35
13. Des contraintes liées à la topographie du territoire	37
2. L'émergence de critères.....	39
21. Les données disponibles.....	39
22. Approche théorique	41
a) L'environnement	42
b) La tâche	44
c) L'individu	45
23. Les limites de cette approche.....	46
24. Une vision plus pragmatique.....	46
PARTIE 3.....	50
Vers une modélisation de l'effort	50
1. Le partenariat avec le département informatique	51
11. Les contraintes à respecter	51
12. Le principe de fonctionnement de Géovélo et du modèle	52
13. Un premier classement des critères entre eux	55
a) Matériel	55
b) Age.....	55
c) Sexe.....	56

d) Distance	56
e) Pente	57
2. Les types de trajets possibles	58
21. Les arcs du graphe	58
22. Quels enchaînements possibles ?	59
Cependant on peut opposer deux limites quand à la modélisation de ce concept : ..	59
3. Comment générer le calcul ?	60
31. Elaboration de la formule.....	60
a) Les critères « pente » et « distance ».....	60
b) Les critères renseignés par le cycliste.	63
32. Quelques trajets tests	64
33. Les limites de ce modèle	64
4. L'interface du site	65
41. La carte interactive.....	65
42. Le choix des critères	65
43. Les informations	67
Conclusion.....	68
Bibliographie.....	70
Table des figures.....	71
Table des illustrations	72
Table des matières.....	73
ANNEXES.....	76

ANNEXES

Annexes 1 : RPE scale de Borg p. 77

Annexes 2 : Effort et fréquence cardiaque p. 78

Scale Instructions

While exercising we want you to rate your perception of exertion, i.e., how heavy and strenuous the exercise feels to you. The perception of exertion depends mainly on the strain and fatigue in your muscles and on your feeling of breathlessness or aches in the chest.

Look at this rating scale; we want you to use this scale from 6 to 20, where 6 means "no exertion at all" and 20 means "maximal exertion."

6	No exertion at all
7	
8	Extremely light
9	Very light
10	
11	Light
12	
13	Somewhat hard
14	
15	Hard (heavy)
16	
17	Very hard
18	
19	Extremely hard
20	Maximal exertion

Borg RPE/ scale
© Gunnar Borg, 1970, 1985, 1994, 1998

Figure 7.1 The Borg RPE scale for perceived exertion.

- 9 corresponds to "very light" exercise. For a normal, healthy person it is like walking slowly at his or her own pace for some minutes.
- 13 on the scale is "somewhat hard" exercise, but it still feels OK to continue.
- 17 "very hard" is very strenuous. A healthy person can still go on, but he or she really has to push him- or herself. It feels very heavy, and the person is very tired.
- 19 on the scale is an extremely strenuous exercise level. For most people this is the most strenuous exercise they have ever experienced.

Try to appraise your feeling of exertion as honestly as possible, without thinking about what the actual physical load is. Don't underestimate it, but don't overestimate it either. It's your own feeling of effort and exertion that's important, not how it compares to other people's. What other people think is not important either. Look at the scale and the expressions and then give a number.

Any questions?

Annexes 2 : Effort et fréquence cardiaque

FC max	intensité de l'effort	filière	type d'effort	durée de l'effort	récupération
95%	maximale	ATP CP	sprint court	7 sec	3 min
100%	sous-maximale	glycolyse anaérobie	sprint long	30 s à 1 min	20 min à 1 heure
96% à 100%	sur-critique	glycolyse aéro-anaérobie + aérobie	poursuite	5 à 7 min	1 à 6 heures
92% à 96%	seuil	glycolyse aéro-anaérobie + aérobie	record de l'heure	20 min à 1 heure	12 à 36 heures
85% à 92%	soutenue	glycolyse aéro-anaérobie + lipolyse	peloton	1 à 2 heures	24 à 48 heures
75% à 85%	modérée	lipolyse + glycolyse aérobie	endurance de base	plusieurs heures	24 à 48 heures
< 75%	légère	lipolyse + glycolyse aérobie	décontraction	plusieurs heures	24 à 72 heures

Source : <http://www.veloclubsaintjulien.fr/images/technique/intensites.jpg>

