

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

MASTER 2 CSMI

Création d'outils pour l'analyse de la performance sportive

Laurène Guidet

*Tuteur université : M. Prud'homme
Christophe
Tuteur : M. Forot Jonas*

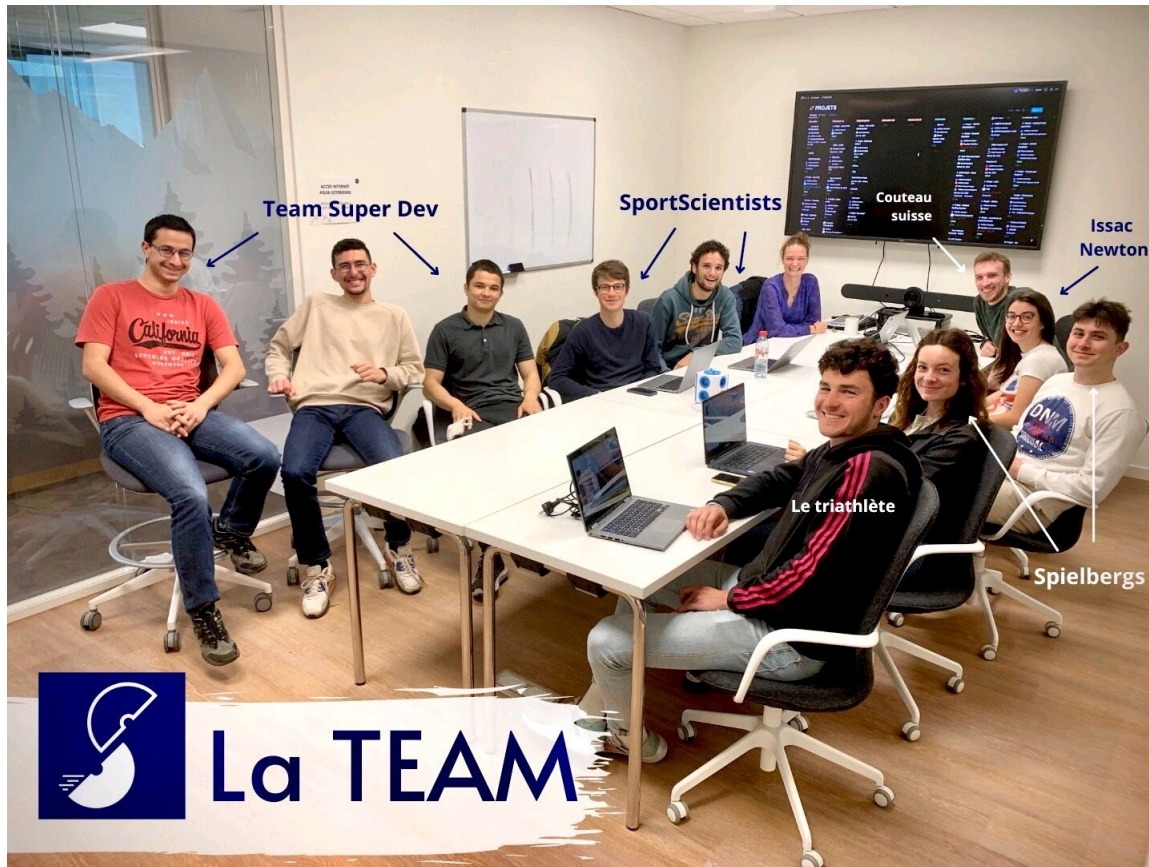
Année 2021-2022

Contents

1	Remerciements	1
2	Introduction	2
2.1	Contexte général	2
2.2	Présentation de l'entreprise	2
2.3	Présentation des tests physiologiques réalisés par Sporttesting	2
2.4	Données issues des tests	5
3	Mes objectifs	8
3.1	Sujet de stage	8
3.2	Road Map	8
4	Plateforme Sportgen : mise en place d'un algorithme de traitement des données de test	9
4.1	Présentation de la plateforme Sportgen	9
4.2	Mon rôle dans ce projet	11
4.3	Algorithme de nettoyage des données	11
4.4	Formules de calcul des différents indicateurs	13
5	Création d'une bande son pour des tests incrémentaux	24
5.1	Présentation du problème	24
5.2	Méthode de création de la bande son	24
5.3	Intégration de la génération de bande son à la plateforme Sportgen	26
6	Modèle de prédiction de performance	27
6.1	Introduction	27
6.2	Premier modèle : modèle de Keller	27
6.2.1	Le modèle en détails	27
6.2.2	Simulations numériques du modèle de Keller	27
6.3	Amélioration du modèle de Keller	29
6.4	Détermination des paramètres physiologiques utiles au modèle	29
6.5	Tests du modèle de Keller sur différents athlètes	30
6.6	Amélioration du modèle	31
7	Analyse des données du CNSNMM	32
8	Conclusion	35
9	Lexique	36

1 Remerciements

Avant de commencer ce rapport de stage, je tenais à remercier toutes les personnes qui m'ont aidées pendant ce stage. Je tiens à remercier plus particulièrement Jonas Forot et Mélissa Muzeau pour la confiance qu'ils m'ont accordé et l'autonomie qu'ils m'ont laissée pour mener à bien ces différents projets. Je remercie aussi Adeline Leclercq-Samson pour avoir trouvé une solution qui m'a permis de continuer mon stage jusqu'au bout malgré la situation compliquée. Je remercie également toute l'équipe de Sporttesting pour leur bonne humeur sans faille et les bons moments passés ensemble (surtout les sorties à la Bastille) et sans qui ces projets n'auraient pas pu être menées à bien.



2 Introduction

2.1 Contexte général

Il est de plus en plus difficile d'améliorer les performances sportives tant les recherches sur le sujet avancent. Aujourd'hui, les données récoltées sur les athlètes sont de plus en plus précises, massives et diversifiées et ne demandent qu'à être exploitées. En effet, les données telles que la fréquence cardiaque, la puissance, la cadence sont des éléments très utilisés dans le monde de l'entraînement. C'est dans ce contexte que la data science est de plus en plus utilisée dans le monde du sport, en effet, elle permet d'apporter un nouveau regard sur ces données récoltées pendant les entraînements, compétitions ou lors de tests spécifiques. Elles permettent ainsi de fournir aux entraîneurs des outils et des leviers leur permettant de mieux analyser les performances des athlètes afin de déterminer leurs forces et leurs faiblesses et ainsi d'exploiter tout leur potentiel.

2.2 Présentation de l'entreprise

Sporttesting est une start-up qui a été créée en juin 2020 par Jonas Forot, Mélissa Muzeau et Damien Padilla. C'est le premier laboratoire itinérant français dédié à la performance sportive. Sporttesting se déplace sur le terrain pour évaluer les capacités physiologiques, musculaires, cognitives et psychologiques des athlètes. Elle accompagne des clubs, fédérations et sportifs de haut niveau ou amateur dans leur processus de performance grâce à leur expertise dans la captation, le traitement et l'interprétation des données de performance. Sporttesting collabore avec le Laboratoire Jean Kuntzmann (LJK), qui est un laboratoire de mathématiques appliquées et d'informatique situé à Grenoble. Sporttesting a cessé son activité depuis le 22 juin 2022 pour cause de difficultés financières.



Figure 1: Logo Sporttesting



Figure 2: Logo LJK

2.3 Présentation des tests physiologiques réalisés par Sporttesting

On présentera ici les tests physiologiques qui constituent la plus grande partie des tests effectués par Sporttesting aujourd'hui. Ces tests physiologiques sont essentiellement destinés à des sportifs d'endurance : coureurs, cyclistes et triathlètes. Ces tests permettent de déterminer le profil de l'athlète pour lui permettre d'identifier ses leviers de progression, et de définir ses zones d'entraînement. Un test comporte

plusieurs parties différentes et dure environ 1 h 30. On trouvera dans le lexique en annexe les définitions des principales notions de physiologie décrites dans ce rapport.

La première partie du test consiste à répondre à un questionnaire pour déterminer son état de forme du jour. Ensuite, nous mesurons la composition corporelle (masse grasse, masse maigre, hydratation) de l'athlète à l'aide d'un impédancemètre. Puis, nous mesurons les capacités pulmonaires à l'aide d'un test de spirométrie.



Figure 3: Mesure d'impédancemétrie

Nous effectuons aussi un test VO₂max par palier. Il s'agit d'un test incrémental. On commence par mesurer les valeurs au repos de l'athlète avant d'effectuer ce test, c'est-à-dire que l'athlète reste immobile pendant 3 minutes. Puis l'athlète commence à courir à une vitesse assez faible que l'on choisit selon le niveau de l'athlète (8,10 ou 12 km/h) puis chaque minute, on augmente la vitesse de 0.5 km/h jusqu'au maximum de ce que l'on est capable de tenir (le test se termine quand l'athlète ne peut plus maintenir la vitesse demandée).



Figure 4: Test VO2max

Le dernier test consiste en un test Wingate qui sert à mesurer les qualités d'explosivité de l'athlète. On effectue d'abord 5 minutes de récupération active pour récupérer du test de VO2max puis on effectue un sprint maximal de 30 s. On récupère ensuite pendant 20 minutes durant lesquelles on va mesurer la lactatémie à intervalles réguliers.



Figure 5: Prise de lactate

2.4 Données issues des tests

Pour chaque test physiologique, on dispose de 3 fichiers : un fichier TCP au format xml issu du capteur qui mesure les échanges gazeux utilisés pour le test VO2max, un fichier nommé Z-metrics qui donne les résultats d'impédancemétrie et un fichier Excel nommé DataQ écrit à la main dans lequel on reporte les données ne pouvant pas être générées de manière automatique (lactate, seuils ...). On dispose d'environ 30 tests réalisés en course à pied et le même nombre pour le cyclisme. Pour chaque test, on a environ une centaine d'indicateurs qui sont calculés, on présentera dans la suite de ce rapport seulement une partie de ses indicateurs pour ne pas trop l'alourdir.

Voici un extrait des données du test VO2max :

t	Phase	Marqueur	VO2	VO2/kg	VO2/FC	FC	TT	VE/VO2	VE/VCO2	RER	VE	VT	BF
h:mm:ss.ms			L/min	ml/min/kg	ml	/min	W				L/min	L	/min
0:00:14,000	Repos		0.49	7	8	61	0	21.4	25.1	0.85	11.7	1.15	10
0:00:15,000	Repos		0.49	7	8	61	0	21.4	25.1	0.85	11.7	1.15	10
0:00:16,000	Repos		0.49	7	8	61	0	21.4	25.1	0.85	11.7	1.15	10
0:00:17,000	Repos		0.49	7	8	61	0	21.4	25.1	0.85	11.7	1.15	10
0:00:18,000	Repos		0.49	7	8	61	0	21.4	25.1	0.85	11.7	1.15	10
0:00:19,000	Repos		0.49	7	8	61	0	21.4	25.1	0.85	11.7	1.15	10
0:00:20,000	Repos		0.48	7	8	61	0	22.3	26.0	0.86	11.9	1.20	10
0:00:21,000	Repos		0.48	7	8	61	0	22.3	26.0	0.86	11.9	1.20	10
0:00:22,000	Repos		0.48	7	8	61	0	22.3	26.0	0.86	11.9	1.20	10
0:00:23,000	Repos		0.48	7	8	61	0	22.3	26.0	0.86	11.9	1.20	10
0:00:24,000	Repos		0.48	7	8	61	0	22.3	26.0	0.86	11.9	1.20	10
0:00:25,000	Repos		0.48	7	8	61	0	22.3	26.0	0.86	11.9	1.20	10
0:00:26,000	Repos		0.37	5	6	60	0	21.3	24.7	0.86	9.2	0.88	10
0:00:27,000	Repos		0.37	5	6	60	0	21.3	24.7	0.86	9.2	0.88	10
0:00:28,000	Repos		0.37	5	6	60	0	21.3	24.7	0.86	9.2	0.88	10
0:00:29,000	Repos		0.37	5	6	60	0	21.3	24.7	0.86	9.2	0.88	10
0:00:30,000	Repos		0.37	5	6	60	0	21.3	24.7	0.86	9.2	0.88	10
0:00:31,000	Repos		0.45	6	8	59	0	20.9	24.4	0.86	10.8	0.97	11
0:00:32,000	Repos		0.45	6	8	59	0	20.9	24.4	0.86	10.8	0.97	11
0:00:33,000	Repos		0.45	6	8	59	0	20.9	24.4	0.86	10.8	0.97	11
0:00:34,000	Repos		0.45	6	8	59	0	20.9	24.4	0.86	10.8	0.97	11
0:00:35,000	Repos		0.45	6	8	59	0	20.9	24.4	0.86	10.8	0.97	11
0:00:36,000	Repos		0.45	6	8	59	0	20.9	24.4	0.86	10.8	0.97	11
0:00:37,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:38,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:39,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:40,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:41,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:42,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:43,000	Repos		0.38	5	6	58	0	20.8	24.4	0.85	9.1	0.91	10
0:00:44,000	Repos		0.38	5	7	58	0	20.9	24.4	0.85	9.1	1.01	9
0:00:45,000	Repos		0.38	5	7	58	0	20.9	24.4	0.85	9.1	1.01	9
0:00:46,000	Repos		0.38	5	7	58	0	20.9	24.4	0.85	9.1	1.01	9

On trouve dans ce fichier les données de :

- VO2 (en L/min) : consommation d'oxygène
- VO2 par kg (en mL/min/kg) : consommation d'oxygène ramené au poids de l'athlète
- VO2/FC (en mL/bpm)
- FC (en bpm) : fréquence cardiaque
- Puissance (en W)
- VE/VO2 (sans unité) : ratio entre le débit ventilatoire et la consommation d'oxygène
- VE/VCO2 (sans unité) : ratio entre le débit ventilatoire et la production de gaz carbonique
- RER (ratio exchange respiratory) : VCO2/VO2
- VE (en L/min) : débit ventilatoire (volume courant * fréquence respiratoire)
- VT (en L) : volume courant
- BF (cycles/min) : fréquence respiratoire

Voici un extrait des données d'impédancemétrie :

Métabolisme basal (kcal/j)	1760.85
Besoins Energétiques (kcal/j)	3345.61
Indice de Masse Corporelle (kg/m²)	22.19
Poids idéal selon la méthode de Lorentz (kg)	74
Delta de poids	0.5
Surface corporelle (m²)	

On utilise qu'une partie de ses données dont l'IMC, le métabolisme basal, le contenu minéral osseux, l'index de masse musculaire.

Voici un extrait des données rentrées à la main :

Niveau	
informations	Valeurs
Niveau	National ▾
Protocole	12 ▾
Macro	
informations	Valeurs
Début	
Seuil 1	0:14:16
Seuil 2	00:18:20

On a les mesures de lactate à différents moments, la distance parcourue lors du test Wingate, le niveau de l'athlète, le protocole utilisé (la vitesse ou puissance de départ du test VO2) et les seuils déterminés manuellement.

Ensuite, ses données sont traitées par une macro Excel qui calcule de nombreux indicateurs utiles à l'analyse des résultats.

Voici un exemple d'indicateurs dont on dispose :

indicateurs de Performance	
Informations ▾	Données ▾
Masse grasse	9,73
Masse musculaire	50,06
VO2 max \ poids de co	73,502693398233
VMA (Km\h)	21,4
SV2 (Km\h)	19,9
SV1 (Km\h)	17,9
FCmax (bpm)	181

Figure 6: Indicateurs de performance

On dispose d'indicateurs de performance comme la VO2max, le SV1 et le SV2.

A partir de ses indicateurs, on génère un bilan qui reprend une grande partie de ses indicateurs et on interprète les données.

Voici un extrait du bilan généré :

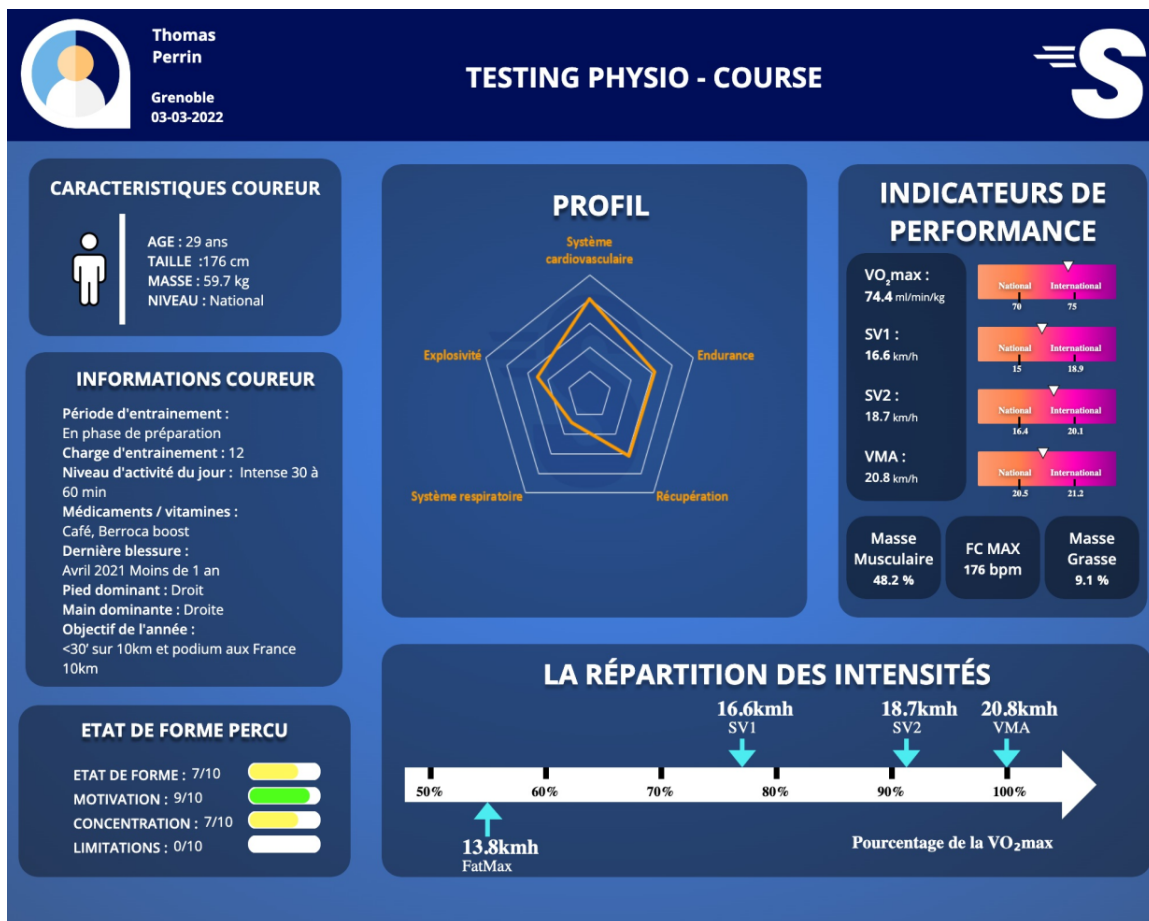


Figure 7: Extrait de la 1ère page d'un bilan Sporttesting

Sur la première page, on retrouve les informations de la personne et son état de forme. De plus, on a une araignée qui permet de définir le profil de l'athlète, c'est-à-dire ses forces et ses faiblesses. On a aussi ses indicateurs de performance et une jauge qui lui permet de se situer par rapport aux autres athlètes de son niveau.

3 Mes objectifs

3.1 Sujet de stage

Etant la seule data scientist de l'équipe, j'avais pour rôle de m'occuper de tout ce qui concernait l'analyse des données. Ce stage peut être divisé en plusieurs projets distincts :

Le premier projet consistait à intervenir dans la création de la plateforme Sportgen qui permettrait d'analyser les données issues des tests que l'on fait au sein de Sporttesting de manière quasiment automatique. Mon rôle était de calculer à partir des données brutes les différents indicateurs du bilan de la manière la plus fiable possible pour avoir des données interprétables et de réunir ses indicateurs dans un fichier facilement utilisable par les développeurs pour ensuite créer le bilan final. Comme le but de cette plateforme était de simplifier l'organisation et l'analyse des tests, j'ai aussi créé des bandes sons pour simplifier l'organisation des tests de VO2max.

Le deuxième projet était plus libre, j'étais à l'initiative de projet utilisant les données pour la performance et c'est pour cela que j'ai choisi d'implémenter un algorithme qui permet d'estimer la performance en course à pied en m'inspirant de ce qui existait dans la littérature. J'ai choisi le modèle le plus adapté aux données dont je disposais à Sporttesting et je l'ai ensuite adapté à ses données. Cela permettra à l'athlète d'avoir une idée du temps qu'il pourrait faire sur une distance donnée lui donnant une indication supplémentaire sur son niveau à l'issue de son test avec Sporttesting.

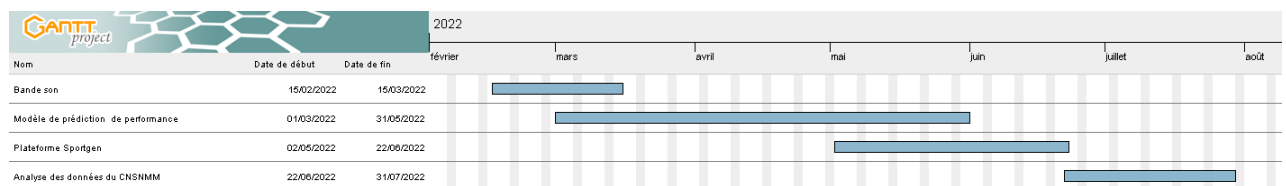
La dernière partie de ce stage consistait en une collaboration avec le CNSNMM (Centre National de Ski Nordique et de Moyenne Montagne) pour analyser leurs données, en effet, nous disposons d'environ 600 tests VO2 effectués durant ces 20 dernières années dans ce centre. L'objectif est de calculer certains indicateurs de performance tels que la VO2max, la consommation des lipides en fonction de l'intensité de l'effort puis d'analyser la répartition de ceux-ci pour définir des normes et ainsi pouvoir situer les athlètes par rapport à ses normes. Actuellement, les études sur ces normes prennent en compte peu de sujets, c'est-à-dire une dizaine en général, ce qui permettra de mettre à disposition des sport scientist des normes faites sur un plus grand échantillon.

3.2 Road Map

Au sein de l'équipe, nous faisons une réunion hebdomadaire pour faire le point sur l'avancement des différents projets menés par les uns et les autres. Je faisais aussi une visioconférence avec mon tuteur toutes les semaines au début puis toutes les 2 semaines afin de faire un point sur l'avancement des projets sur les données et les interprétations que nous pourrions tirer des analyses.

Pour mener à bien ces différents projets, nous avons utilisé différents outils tels que VSCode et Github pour le projet sur la plateforme, ce qui a permis de collaborer de manière simple avec les développeurs. Pour les projets que je gérais seule, j'ai aussi utilisés Google Colab par mesure de simplicité pour présenter les résultats et partager les notebooks aux sport scientist. Le langage Python a été utilisé pour tous les projets.

Voici l'organisation temporelle de mon stage sous forme de road map :



4 Plateforme Sportgen : mise en place d'un algorithme de traitement des données de test

4.1 Présentation de la plateforme Sportgen

La plateforme Sportgen sera une application web qui permettra de traiter les données de tests physiologiques. Elle permettra de consulter les différentes sessions de test, les données des sportifs et surtout de générer un bilan quasiment automatiquement à partir des fichiers bruts. A partir de cette plateforme, on dispose aussi d'outils d'aide aux entraineurs comme la génération de bande son pour les tests VO2max incrémentaux.

Voici des extraits de la maquette de la plateforme :

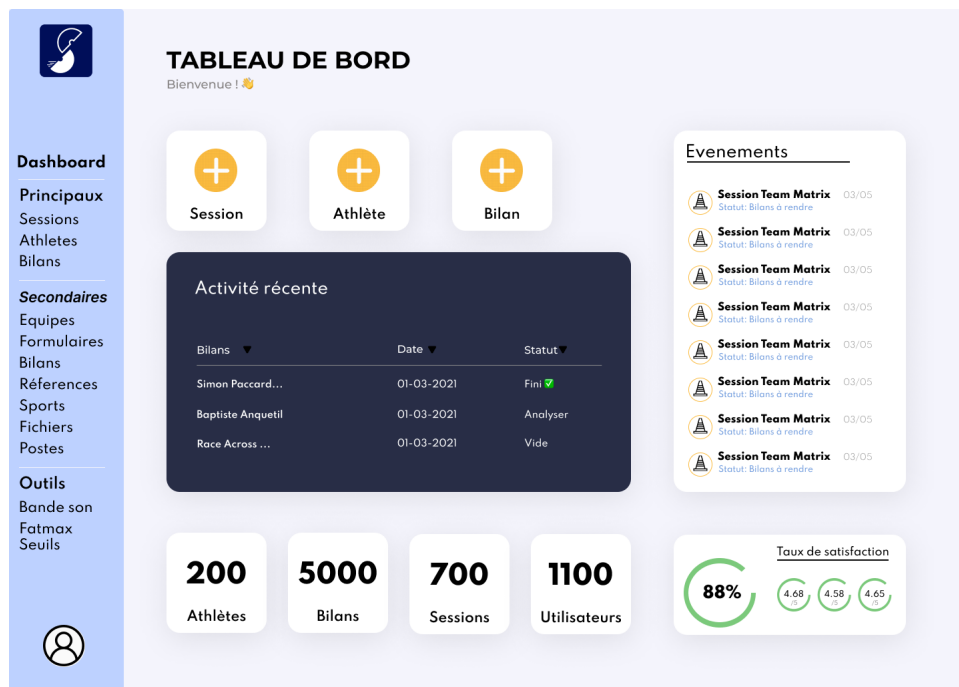


Figure 8: Ecran d'accueil de la plateforme

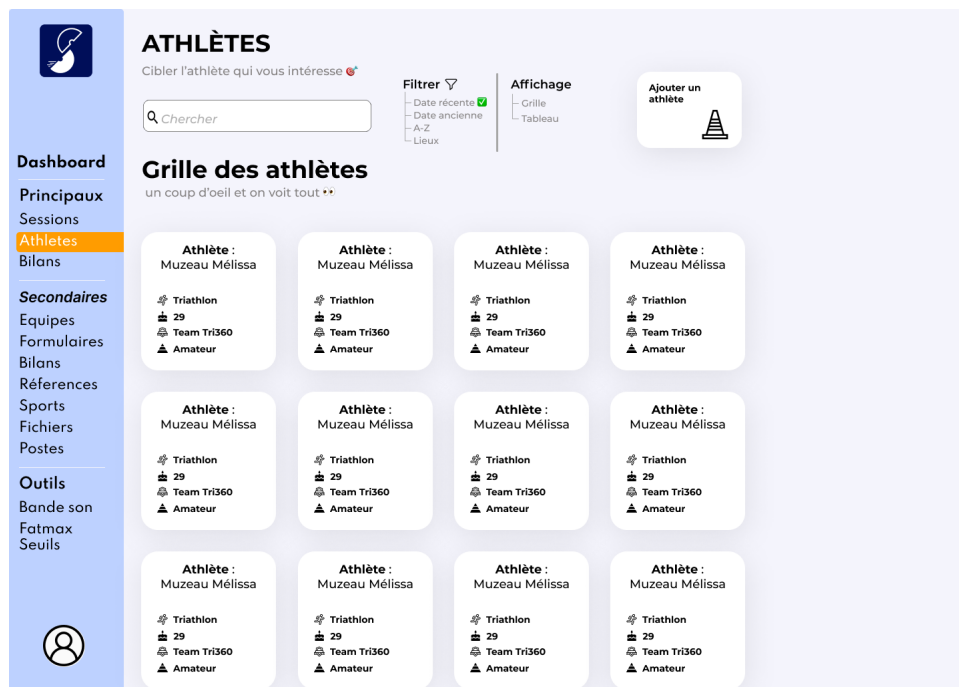


Figure 9: Visualisation des athlètes

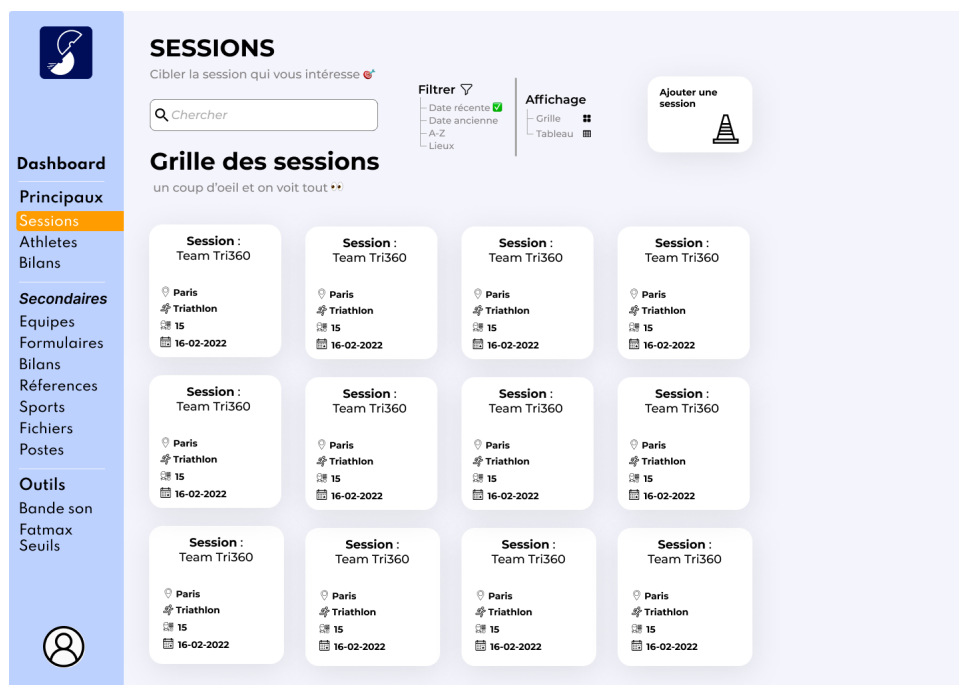


Figure 10: Visualisation des sessions de test

4.2 Mon rôle dans ce projet

Cette plateforme a été développée en collaboration avec les développeurs de l'équipe mais aussi les sport scientist afin de mieux comprendre leurs besoins comme ce seront eux les principaux utilisateurs de celle-ci. Mon rôle dans ce projet consistait à écrire les algorithmes de nettoyage et de traitement des données bruts afin d'obtenir les différents indicateurs utilisés dans le bilan. A la fin de ces algorithmes, on renvoie un fichier JSON contenant toutes les données qui seront sur un bilan. Le choix et le format du fichier JSON s'est fait après discussion avec les développeurs qui estimait qu'il serait plus simple pour eux de traiter un fichier sous ce format pour ensuite pouvoir générer le bilan final.

4.3 Algorithme de nettoyage des données

La première chose à faire avant de calculer les différents indicateurs présents dans le bilan est de nettoyer les données. En effet, comme il s'agit de données issues de capteurs, si on extrait les données brutes, on peut remarquer des données erronées. Il y en a plus ou moins selon les tests, cela peut être dû aux conditions de test (extérieur, type de sport...).

Voici un exemple des données de VO2 brutes issues d'un test de VO2max :

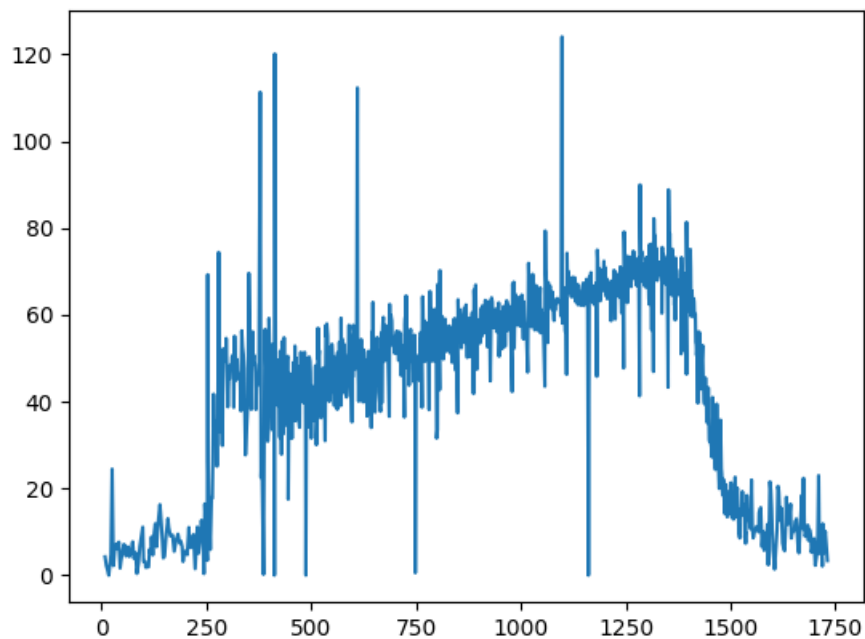


Figure 11: Données de VO2 avant nettoyage par l'algorithme

Nous avons mis en place un algorithme permettant de nettoyer les données brutes du fichier TCP qui ont au préalable été mis sous format dataframe par un algorithme mis au point par le développeur responsable du projet sur la plateforme. La première étape de cet algorithme consiste à enlever les outliers qu'on remplace à chaque fois par la valeur précédente.

Ensuite, on met en forme certaines valeurs telles que le temps qu'on met en seconde et on remplit les valeurs manquantes par les valeurs précédentes.

Puis, comme il serait en pratique très peu probable que les valeurs changent brutalement entre 2 mesures, pour chaque valeur, nous la comparons à la moyenne des 3 valeurs précédentes et suivantes par rapport à un seuil de variation fixé par l'expérience du terrain des sport scientist et si la valeur semble erronée, nous la remplaçons par la moyenne des 3 valeurs précédentes et suivantes.

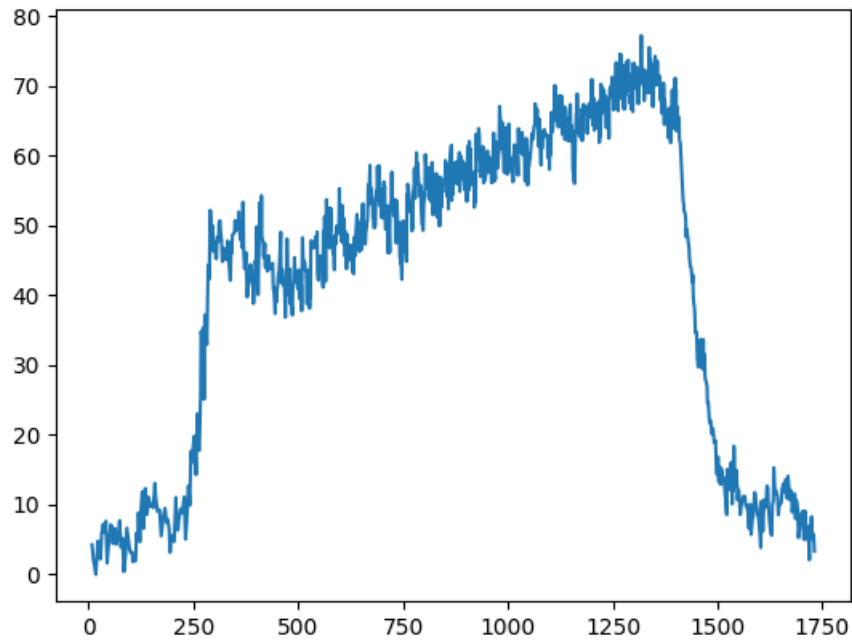


Figure 12: Données de VO2 nettoyées

Au moment d'exporter les données brut du fichier TCP, les sport scientist ont plusieurs possibilités : exporter un fichier avec des valeurs prises souffle à souffle qui sont les valeurs réellement mesurées par le Metamax (l'appareil qui sert à mesurer les échanges gazeux) ou d'exporter ces données seconde par seconde grâce à un algorithme mis au point par le logiciel Metasoft (logiciel qui traite les données du Metamax). Le problème de cet algorithme est qu'il engendre beaucoup plus de bruit dans les données seconde par seconde que dans celle souffle à souffle.

Nous avons donc décidé de traiter directement les données souffle à souffle et de créer un modèle qui nous permettrait d'extrapoler des valeurs seconde par seconde dont nous avons besoin pour pouvoir calculer les indicateurs par la suite (les formules de certains indicateurs utilisent le temps). Pour cela, nous avons choisi la régression par spline qui nous permet d'obtenir les valeurs en seconde par seconde de manière assez proche de la réalité. On lisse au préalable les données sur 3 données.

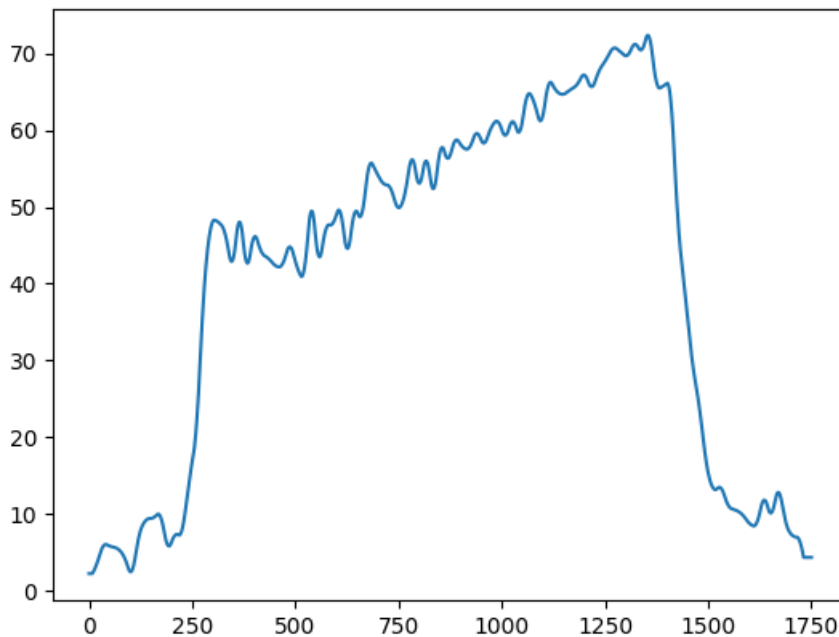


Figure 13: Données de VO2 après la régression par spline

On a ensuite une dataframe contenant chaque indicateur seconde par seconde.

Comme certains fichiers TCP présentes beaucoup de valeurs abhéroentes et d'autres beaucoup moins, nous avons commencé à créer un indice de fiabilité du fichier en prenant en compte le nombre d'outliers dans les données et le nombre de valeurs potentiellement fausses (c'est-à-dire les valeurs que l'on a modifiées car on a considéré qu'elle variait beaucoup par rapport à la précédente). Cela permettrait aux sport scientist souhaitant générer un bilan de savoir si les résultats du bilan qui lui semblent surprenants pourrait être dû à des problèmes lors du test (problème de capteurs, conditions extérieures ...). Pour cela, la première idée était de compter le nombre d'outliers et de définir le pourcentage d'outliers dans le fichier. Ensuite, on comparerait ses valeurs aux quartiles de statistiques qu'on aurait réalisé sur les fichiers que l'on a à disposition.

```

1 #indice fiabilité
2 pourcentage_outliers = df_TCP['VO2_kg'].isna().sum()/len(df_TCP['VO2_kg'])
3 if pourcentage_outliers<0.01:
4     fiabilite_outliers = "peu d'outliers"
5 if pourcentage_outliers>0.01 and pourcentage_outliers<0.05:
6     fiabilite_outliers = "nb outliers dans la moyenne"
7 if pourcentage_outliers>0.05:
8     fiabilite_outliers = "beaucoup d'outliers"

```

Cela aurait dû être la prochaine amélioration à apporter à ce code qui n'a pas pu être totalement réalisé dû au fait de la fermeture de l'entreprise et l'arrêt des projets lié à son développement.

4.4 Formules de calcul des différents indicateurs

Maintenant que l'on a une dataframe nettoyé, on peut calculer les différents indicateurs de performance en s'inspirant des formules qui ont été mises en place dans la macro Excel et en les adaptant aux différentes contraintes de manière automatique (type sport, lieu du test, protocole de test ...). Elles sont issues d'articles

de physiologie (article [3]) qui ont été sélectionnés par les sport scientist. Pour commencer, on regarde de quel sport il s'agit : c'est-à-dire s'il s'agit d'un test course à pied ou cyclisme (les calculs et indicateurs peuvent être différents selon le sport) et si le test a été effectué en intérieur ou en extérieur pour la course à pied (le test Wingate est effectué sur vélo si le test est fait en intérieur et dans ce cas les calculs utilisant ces valeurs seront les mêmes que pour le cyclisme).

En général, un protocole de test est indiqué au logiciel MétaSoft qui nous donne le fichier TCP, ce qui nous donne les phases de repos, d'exercice et de rétablissement du test. Cependant, parfois aucun protocole n'est rentré et dans ce cas, dans le fichier TCP, la phase indiquée est par défaut toujours 'Exercice'. Pour palier à ce problème, on indique les temps de début et de fin de l'exercice dans le fichier DataQ, cela nous permet donc de placer au bon endroit les phases repos, exercice et rétablissement qui seront utiles dans nos calculs par la suite. Cela nous permet de sélectionner une variable uniquement sur la phase de repos, d'exercice ou de rétablissement.

De plus, pour la course à pied, on ne dispose pas des vitesses dans le fichier TCP, pour résoudre ce problème, on recrée la colonne en prenant en compte le protocole qui a été utilisé : en effet, on dispose de la vitesse de départ qui a été choisie dans le fichier DataQ. À partir de cela, comme on sait que la vitesse augmente de 0.5 km/h toutes les minutes, on peut savoir à quelle vitesse se trouvait l'athlète.

On s'occupera à présent de calculer les indicateurs de performance par catégories. En effet, les indicateurs que l'on doit calculer sont stockés en différentes catégories pour nous permettre de retrouver plus facilement les informations. Ces catégories sont les mêmes que celles présentes dans le bilan, ce qui facilitera la génération du bilan par la suite.

La première catégorie est la catégorie appelée "Indicateurs de performance" qui regroupe les indicateurs les plus importants contenus dans le bilan tels que la masse musculaire, la masse grasse, la VO2max, la FCmax, la VMA/PMA, le SV1, le SV2 (voir le lexique en annexe).

Indicateurs de performance		
Informations	Unités	Calcul
Masse grasse	% du poids	Récupérer dans le fichier Z-metrics
Masse musculaire	% du poids	Récupérer dans le fichier Z-metrics
VO2max/poids corps	ml/kg/min	Lissage de la VO2 sur 10 s et on prend la valeur maximale
PMA/VMA	W/kg ou km/h	Puissance/vitesse à VO2max
SV2	W/kg ou km/h	Puissance/vitesse associée au SV2 indiqué dans le fichier DataQ
SV1	W/kg ou km/h	Puissance/vitesse associée au SV1 indiqué dans le fichier DataQ
FCmax	bpm	Valeur maximale de la fréquence cardiaque

Extrait du fichier JSON contenant les indicateurs de performance :

```

1 "Indicateurs Performance": {
2   "Masse grasse": 9.19,
3   "Masse musculaire": 49.72,
4   "VO2max/poids corps": 74.17107394150582,
5   "PMA/VMA": 19.5,
6   "SV2": 17.1,
7   "SV1": 15.0,
8   "FCmax": 181
9 },

```

On a ensuite la catégorie : "Flèches répartition des intensités" qui permet de situer les différentes intensités en fonction de la VO2max et d'avoir les vitesses/puissances associées.



Figure 14: Flèches de répartition des intensités dans le bilan

Voici les formules pour le cyclisme et la course à pied pour la catégorie flèches répartition intensité :

Flèches de répartition des intensités		
Informations	Unités	Calcul
Fatmax	% de VO2max	Valeur de VO2 (lissée sur 10 s) associée au Fatmax indiqué dans le fichier DataQ
	W ou km/h	Valeur de puissance/vitesse associée au Fatmax indiqué dans le fichier DataQ
SV1	% de VO2max	Valeur de VO2 (lissée sur 10 s) associée au SV1 indiqué dans le fichier DataQ
	W ou km/h	Valeur de puissance/vitesse associée au SV1 indiqué dans le fichier DataQ
SV2	% de VO2max	Valeur de VO2 (lissée sur 10 s) associée au SV2 indiqué dans le fichier DataQ
	W ou km/h	Valeur de puissance/vitesse associée au SV2 indiqué dans le fichier DataQ
PMA/VMA	% de VO2max	La PMA/VMA correspond à la puissance/vitesse à VO2max donc la valeur est toujours de 100 % ici
	W ou km/h	Puissance/vitesse à VO2max
Carbmax	% de VO2max	Valeur de VO2 (lissée sur 10 s) associée au Carbmax (voir précision ci-dessous pour le calcul de Carbmax)
	W ou km/h	Valeur de puissance/vitesse associée à Carbmax

Pour calculer Carbmax, on fixe un seuil en quantité de glucides par heure (65,70,80,90 g/h) en fonction

du niveau de l'athlète (amateur, régional, national ou international) et on regarde à quel moment l'athlète dépasse ce seuil pendant le test.

Extrait du fichier JSON pour la catégorie flèches répartition intensité :

```
1 "Flèches répartition intensité": {
2   "Fatmax %VO2max": 69.4,
3   "SV1 %VO2max": 73.72,
4   "SV2 %VO2max": 82.82,
5   "VMA/PMA %VO2max": 100,
6   "Fatmax": 14.3,
7   "SV1": 15.0,
8   "SV2": 17.1,
9   "VMA/PMA": 19.5,
10  "Carbmax %VO2max": 20.867719686607675,
11  "Carbmax": 11.5
12 },
```

La catégorie "Composition Corporelle" est composée de données que l'on récupère dans le fichier Z-metrics comme la masse grasse, musculaire, l'IMC, l'hydratation du corps...

```
1 "Composition corporelle": {
2   "masse_grasse": 9.19,
3   "masse_musculaire": 49.72,
4   "masse_musculaire_abs": 35.85,
5   "imc": 21.53,
6   "metabolisme_basal": 1826.66,
7   "indice_activité_métabolique": 6.93,
8   "masse_cellulaire_active": 55.47,
9   "index_masse_musculaire": 10.7,
10  "contenu_minéral_osseux": 3.07,
11  "eau_extracellulaire": 40.79,
12  "eau_intracellulaire": 57.53,
13  "hydratation_corps": 62.82
14 },
```

Viens ensuite la catégorie "Système respiratoire" qui correspond aux capacités de ventilation, c'est-à-dire la quantité d'air qu'on est capable de mobiliser. Cela permet à l'oxygène d'entrer dans le corps et de diffuser dans le sang, et au CO2 de quitter le corps. Cela regroupe les valeurs de spirométrie dont le volume pulmonaire, la fréquence respiratoire maximum...

Système respiratoire		
Informations	Unités	Calcul
Volume pulmonaire	L	Récupérer dans le fichier DataQ
Puissance expiratoire	L	Récupérer dans le fichier DataQ
Ratio puissance/volume	%	$\frac{puissance}{volume} * 100$
Débit ventilatoire maximum (VE _{max})	L/min	Valeur maximale de VE (débit ventilatoire)
Fréquence respiratoire maximum	cycle/min	Valeur maximale de la fréquence respiratoire
Volume courant maximum (VT _{max})	L	Valeur maximale du volume courant
Coefficient d'utilisation pulmonaire	%	$\frac{VT_{max}}{Volume_{pulmonaire}} * 100$

Table 1: Système respiratoire

Ce qui donne dans le fichier JSON final :

```

1 "Système respiratoire": {
2   "volume pulmonaire": 6.64,
3   "puissance expiratoire": 4.66,
4   "ratio puissance/volume": 70.18,
5   "débit ventilatoire max": 177.81,
6   "fréquence respiratoire max": 81.49,
7   "volume courant max": 2.86,
8   "coeff d'utilisation pulmonaire": 43.12
9 },

```

On a ensuite les données sur le système cardiovasculaire qui correspond à tout ce qui concerne le transport de l'oxygène. En d'autres termes, c'est ce qui fournit du sang oxygéné aux muscles qui travaillent. Cette catégorie est composée des valeurs de VO2 au repos, de VO2max absolue et relative, la fréquence cardiaque de réserve ...

Système cardiovasculaire		
Informations	Unités	Calcul
VO2 repos	mL/min/kg	Valeur minimale de VO2 (lissée sur une minute) pendant la phase de repos
VO2max absolue	mL/min	Valeur maximale de VO2 (lissée sur 10 s)
VO2max par kg de poids de corps	mL/min/kg	Valeur maximale de VO2 divisé par le poids de corps (lissée sur 10 s)
VO2max par kg de masse musculaire	mL/min/kg	$\frac{VO2_{maxabsolue}}{massemusculaire}$
Quotient respiratoire maximum	sans unité	Valeur maximale du quotient respiratoire (lissé sur 10 s)
Vitesse relative au poids à VO2max ou PMA relative	W/kg ou km/h/kg	$\frac{PMA}{poidsdecors}$ ou $\frac{VMA}{poidsdecors}$
FC à VO2max	bpm	Moyenne sur 3 s de la fréquence cardiaque autour du pic de VO2max (valeur indiquée dans le fichier DataQ)
FC de réserve	bpm	$FC_{max} - FC_{repos}$ avec FC _{repos} qui est la valeur minimale de la FC (lissée sur 10 s) sur la phase de repos
VO2max/FCmax	mL/battements	$\frac{VO2_{maxabsolue}}{FC_{max}}$

Table 2: Système cardiovasculaire

```

1 "Système cardiovasculaire": {
2   "VO2 repos": 4.19,
3   "VO2 max absolue": 5347.73443118257,
4   "VO2 max par kg poids de corps": 74.17107394150582,
5   "VO2 max par kg masse musculaire": 149.1697191403785,

```

```

6  "Quotient respiratoire max": 1.09,
7  "Vitesse à VO2max : VMA": 19.5,
8  "Vitesse relative au poids à VO2max": 0.3,
9  "FC à VO2max": 179,
10 "FC de réserve": 133,
11 "VO2max/FCmax": 29.554644628729626
12 },

```

Le tableau lactate nous donne les concentrations en lactate 1,3,7,20 minutes après le test Wingate ainsi qu'au repos et le lactate max qui est la valeur maximale de lactate mesurée.

Voici un exemple des données de lactate :

```

1 "Lactate": {
2   "Lactate repos": 1.9,
3   "Lactate wingate + 1min": 7.2,
4   "Lactate wingate + 3min": 7.3,
5   "Lactate wingate + 7min": 6.6,
6   "Lactate wingate + 20min": 3.6,
7   "Lactate max": 7.3
8 },

```

On a ensuite une catégorie intitulée "Récupération" qui correspond à la capacité de l'organisme à retrouver à un niveau de base rapidement (fréquence cardiaque, lactatémie). On regarde essentiellement la cinétique de la fréquence cardiaque après l'effort et la capacité de clairance du lactate (voir le lexique en annexe).

Récupération		
Informations	Unités	Calcul
HRR1	bpm	FCmax moins FC 1 min après fin exercice
HRR2	bpm	FCmax moins FC 2 min après fin exercice
HRR3	bpm	FCmax moins FC 3 min après fin exercice
HRRP	bpm	$\frac{FC_{plateau}}{FC_{max}} * 100$ (Voir détail ci-dessous pour FC plateau)
Capacité de clairance du lactate	%	$\frac{Lactate_{max} - Lactate_{20min}}{Lactate_{max}} * 100$
Clairance du lactate	mmol/L/min	$\frac{Lactate_{max} - Lactate_{20min}}{t_{Lactate_{max}} - t_{Lactate_{20min}}}$

Pour le calcul de FC plateau : on fait une régression linéaire sur la première minute post-effort et une régression linéaire sur la dernière minute post-effort. On cherche ensuite le point d'intersection entre ses 2 droites et la FC plateau correspond à la moyenne de la valeur à partir de ce point. On peut dire que c'est le moment où la FC est à peu près stable.

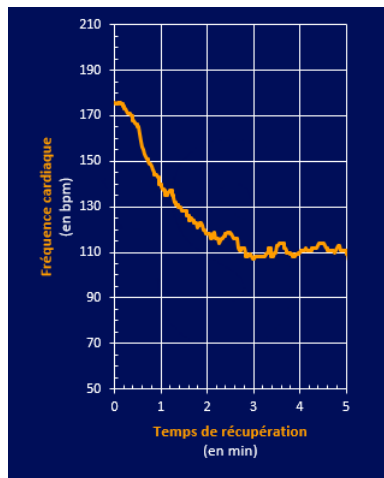


Figure 15: Fréquence cardiaque post-effort

Voici un extrait des données de récupération dans le fichier JSON final.

```

1 "Récupération": {
2   "HRR1": 52,
3   "HRR2": 66,
4   "HRR3": 71,
5   "HRRP": 61.42,
6   "Capacité de clairance du lactate": 50.68493150684932,
7   "Clairance du lactate": 0.19473684210526315
8 },

```

Ensuite, la catégorie "Explosivité" correspond à la capacité à réaliser des efforts courts et intenses. On parle ici d'efforts inférieurs à 5 min, lorsque le système glycolytique est le principal système qui fournit l'énergie.

Explosivité		
Informations	Unités	Calcul
Dégradation des glucides maximum	g/min	Valeur maximale de la consommation de glucides (lissée sur 10 s)
Moyenne aire sous la courbe oxydation glucides	m^2/min	Intégrale de la consommation de glucides divisée par la durée de l'exercice
Aire sous la courbe demande en oxygène	m^2	Intégrale de la demande en oxygène (voir détail ci-dessous)
Puissance/distance Wingate	W ou m	Valeur récupéré dans le fichier DataQ
Fatigue index (uniquement pour le cyclisme)	%	$\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} * 100$
Plateau VO2max	s	temps de fin du test moins le temps où l'on atteint le pic de VO2max (indiqué dans le fichier DataQ)
Puissance glycolytique	sans unité	$lactate_{1min} - lactate_{repos} + (lactate_{1min} - lactate_{3min})^2$ si $lactate_{1min} - lactate_{3min} \geq 0$ $lactate_{1min} - lactate_{repos} + (lactate_{1min} - lactate_{3min})^2$ sinon
Vlamax	mmol/L/s	$((lactate_{max} + (t_{lactatemax} + 0.5) * clairancedulactate) - lactate_{repos})/30$

La demande en oxygène (voir lexique en annexe) est calculé à partir des données de VO2, on fait une régression linéaire sur ses données entre 1 minute après le début de l'exercice et le moment où l'on atteint SV2.

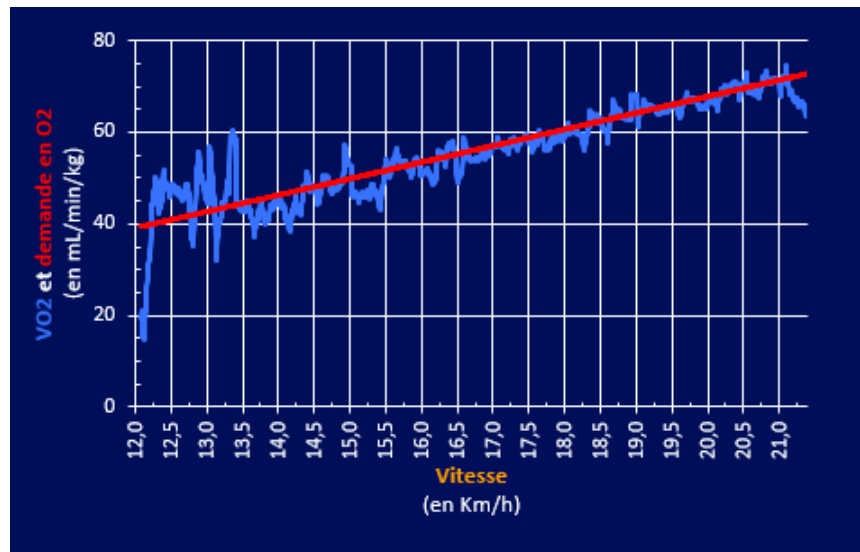


Figure 16: Courbe de demande en oxygène

Voici les données d'explosivité dans le JSON :

```
1 "Explosivité": {
2   "Dégradation des glucides max": 5.8322208659970585,
3   "Moyenne aire sous la courbe oxydation glucides": 206.77736847908304,
4   "Aire sous la courbe demande en oxygene": 55707.60504226846,
5   "Distance Wingate": 218.4,
6   "Plateau VO2max": "31",
7   "Lactate repos": 1.9,
8   "Lactate max": 7.3,
9   "Lactate fin +20'": 3.6,
10  "Puissance glycolytique": 5.2900000000000001,
11  "Vlamax": 0.18973684210526318
12 },
```

Puis, la catégorie "Endurance" qui correspond à la capacité à résister à un effort sur la durée. C'est une mesure importante pour les épreuves d'une durée supérieure à 10 minutes. Cela inclut les valeurs des seuils 1 et 2, le rendement (ou économie) et l'oxydation des graisses.

Explosivité		
Informations	Unités	Calcul
Dégradation des lipides maximum	g/min	valeur de la consommation de lipides à Fatmax
Moyenne aire sous la courbe oxydation lipides	m ² /min	Intégrale de la consommation de lipides divisé par la durée du temps d'exercice
SV1 ou SV2 en pourcentage de Fcmax	%	$\frac{FC_{max}}{FC_{SV1 \text{ ou } SV2}} * 100$
Rendement brut à SV1 ou SV2 ou PMA (pour le cyclisme)	%	Puissance à SV1 ou SV2 ou PMA divisé par l'énergie totale dépensée multiplié par 100
Economie SV1/SV2/VMA (pour la course à pied)	mL/kg/km	VO2 à SV1 ou SV2 ou VMA sur 1 minute divisé par la vitesse à SV1 ou SV2 ou VMA
Moyenne rapport consommation d'oxygène/puissance	mL/min/kg/W	Moyenne du rapport de la puissance ou vitesse sur la VO2 (lissée sur 10 s) sur l'ensemble du test

Cette catégorie contient aussi des données que l'on a déjà calculées précédemment :

```

1 "Endurance, oxydation des graisses": {
2   "Vitesse à FatMax": 14.3,
3   "Dégradation lipides max": 0.8448082112035675,
4   "Moyenne aire sous la courbe oxydation lipides": 39.98194983802594,
5   "%VO2 max": 69.39972122929406
6 },
7 "Endurance SV1": {
8   "SV1 en pourcentage de VO2max": 73.7226691519496,
9   "SV1 en pourcentage de Fcmax": 87.98973498584263,
10  "Ratio SV1\\VMA": 79.41929974380871,
11  "Vitesse SV1": 15.0,
12  "Vitesse SV1 kg": 0.2
13 },
14 "Endurance SV2": {
15   "SV2 en pourcentage de VO2max": 82.81507122010937,
16   "SV2 en pourcentage de Fcmax": 92.66593792261234,
17   "Ratio SV2\\VMA": 89.666951323655,
18   "Vitesse SV2": 17.1,
19   "Vitesse SV2 kg": 0.2
20 },
21 "Endurance rendement": {
22   "Économie SV1": 211.6679823806874,
23   "Économie SV2": 210.5994092892961,
24   "Économie VMA": 228.02379691667036,
25   "Moyenne rapport consommation d'oxygène/vitesse": 0.175327843501736
26 },

```

Enfin, les catégories "Glucides" et "Lipides" nous donne des renseignements sur l'utilisation de ces substrats par le sportif.

On peut calculer la consommation de lipides à partir du RER, si celui-ci vaut 1 (on a besoin d'autant d'O₂ que de CO₂ pour produire une molécule de glucide), cela signifie que l'on ne consomme que des glucides et si celui-ci vaut 0.7 (on utilise plus d'O₂ que de CO₂ pour produire une molécule de lipide), on ne consomme que des lipides. A partir de ça on peut calculer un pourcentage d'utilisation des glucides et des lipides et ainsi avoir les consommations de l'athlète pour une intensité donnée.

Pour calculer le pourcentage de la consommation de glucides, on utilise la formule suivante :

$$\begin{cases} 1 & \text{si } (3.4349 * rer) - 2.4229 > 1 \\ (3.4349 * rer) - 2.4229 & \text{sinon} \end{cases}$$

Ensuite, pour avoir la consommation de glucides en g/min, nous avons besoin de la dépense calorique en kcal/min de la personne qui peut être calculé à partir des données de VO2 avec la formule : $(4.9781 * VO2) - 0.1422$

On sait qu'un gramme de glucides équivaut à 4 kcal et un gramme de lipides à 9.75 kcal, cela nous donne comme formule pour la consommation de glucides en g/min : $kcal_minutes * pourcentage_glucides / 4$ et pour la consommation de lipides en g/min : $kcal_minutes * pourcentage_lipides / 9.75$

Voici un extrait de ses 2 tableaux qui récapitule les informations sur les lipides et glucides que l'on a calculés précédemment.

```
1 "Lipides": {
2   "Dégradation lipides max (minute)": 0.8448082112035675,
3   "Dégradation lipide max (heure)": 50.68849267221405,
4   "Fatmax": 14.3,
5   "FC à FatMax": 153,
6   "%VO2 max à Fatmax": 69.39972122929406,
7   "%FC max à Fatmax": 84.81703963628168,
8   "Aire sous la courbe lipides": 39.98194983802594
9 },
10 "Glucides": {
11   "Dégradation glucides max (minute)": 5.8322208659970585,
12   "Dégradation glucide max (heure)": 349.9332519598235,
13   "Carbmax": 11.5,
14   "FC à Carbmax": 104,
15   "%VO2 max à Carbmax": 20.867719686607675,
16   "%FC max à Carbmax": 57.4848952022089,
17   "Moyenne aire sous la courbe glucides": 206.77736847908304
18 }
```

A l'aide du fichier JSON contenant toutes les informations, on peut générer le bilan final pour différents types de test (cyclisme, course à pied) grâce à l'API Python qui sera créé par les développeurs. Cette fonctionnalité n'a pas encore été totalement développée, cela est dû à l'arrêt du développement des projets concernant Sporttesting.

5 Création d'une bande son pour des tests incrémentaux

5.1 Présentation du problème

Lors des tests physiologiques, on effectue entre autre un test incrémental de VO₂max pour la mesurer. On court à une vitesse qui augmente de manière régulière jusqu'à ce que l'on ne puisse plus tenir la vitesse. Ce test est constitué de différents paliers d'une durée qu'on choisit (généralement 1 minute) et la vitesse augmente de 0.5 km/h à chaque palier. Il existe 2 types de test : soit on décide que la vitesse est constante par palier, soit on augmente la vitesse de manière continue sur chaque palier. On choisit également une vitesse de départ pour le test en fonction du niveau de l'athlète pour que le test dure environ 20 minutes. On effectue ce test en général sur piste d'athlétisme et pour donner un tempo à l'athlète, jusqu'à présent, on place des plots régulièrement répartis sur la piste et on siffle pour lui indiquer l'allure. Le but de ce projet est de créer une bande son qui permettrait à l'athlète de savoir s'il est à la bonne allure en fonction de la vitesse de départ, de la distance entre les plots, de la durée des paliers et du type de test pour simplifier l'organisation des tests.

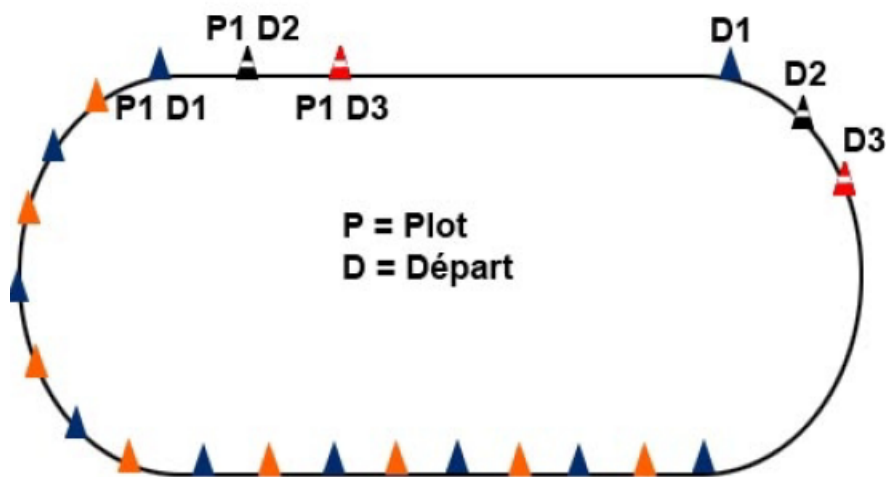


Figure 17: Schéma du test VO₂max

5.2 Méthode de création de la bande son

On cherche tout d'abord à construire un tableau contenant les temps auxquels on souhaite avoir un bip pour donner une indication d'allure à l'athlète. Pour cela, on construit déjà un tableau contenant la distance parcourue à l'instant t depuis le début du test (distance cumulée) en fonction du type de test, puis nous chercherons à déterminer le temps t pour certaines distances d qui correspondront aux emplacements des plots. Pour cela, on trace le temps en fonction de la distance :

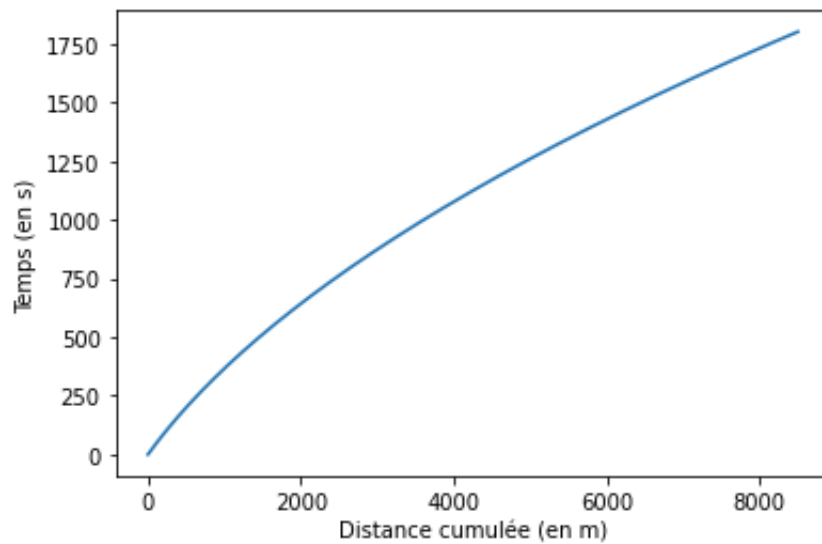


Figure 18: Distantes totale parcourue en fonction du temps

On cherche à trouver un modèle pour approximer cette fonction et ainsi avoir les temps correspondant à la distance des différents plots durant le test. Pour cela, on utilise un modèle polynomial de degré 3.

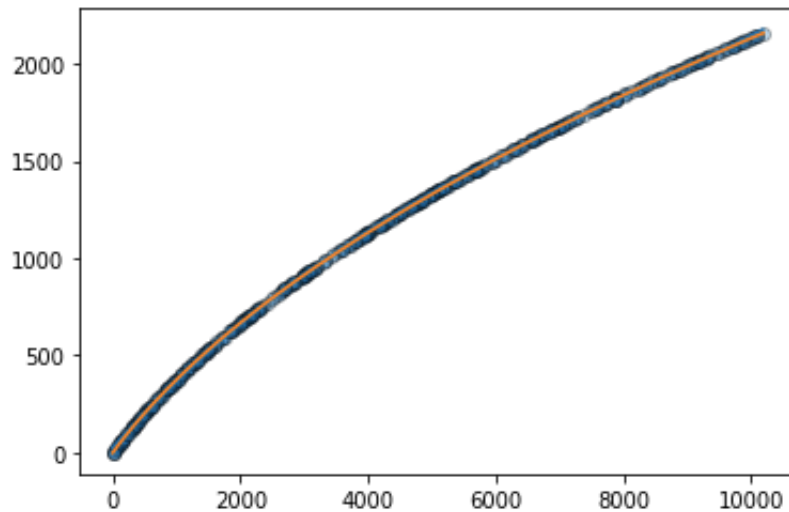


Figure 19: Modèle polynomial de degré 3 sur les données

Pour la création de la bande son, on utilisera le module `soundfile` sous python et on optera pour des bips d'environ 0.3 s. Pour créer cette bande son, on utilise les temps que l'on a déterminé précédemment pour les distances voulues et on met un bip à ces endroits.

La dernière requête pour ce projet était d'ajouter une voix off au départ pour avoir des informations sur le type de test qui correspond à la bande son mais aussi d'avoir des indications sur le temps restant pendant la phase de repos avant le début du test. Cela a été ajouté au fichier audio contenant les bips.

Nous avons donc un algorithme permettant de générer la bande son en fonction de la distance entre les

plots, la vitesse de départ, la vitesse de fin, la durée des paliers, le type de test et la vitesse d'incrémentation (facultative, elle est fixée par défaut à 0.5 km/h).

5.3 Intégration de la génération de bande son à la plateforme Sportgen

Cet algorithme de bande son a été intégré à la plateforme Sportgen grâce aux développeurs et permettra aux entraîneurs de générer la bande son utile pour les tests de VO2max.

The screenshot shows a web interface for generating audio. At the top center is a blue button labeled "Générer Bande Son". Below it, on the left, are five input fields with labels: "vitesse de départ", "vitesse de fin", "durée d'un palier", "type de test", and "distance entre les plots". To the right of these fields are two buttons: a green "Valider" button and an orange "Télécharger" button. In the bottom left corner, there is a dark blue button with two white arrows pointing left ("<<").

Figure 20: Bande son intégré à la plateforme

6 Modèle de prédiction de performance

6.1 Introduction

La prédiction de performance est au coeur des recherches actuelles concernant l'amélioration de la performance sportive. L'objectif de ce projet est de pouvoir déterminer le meilleur temps que pourrait faire un athlète sur une distance donnée. Cela lui donnerait une estimation de la meilleure performance qu'il peut espérer faire. Le modèle que nous allons étudier se base sur des paramètres physiologiques, ainsi cela permettrait même de quantifier l'amélioration de la performance en fonction de l'amélioration de certains paramètres physiologiques. Pour le moment, on s'intéresse à un modèle de prédiction uniquement pour la course à pied. Pour cela, on s'inspirera de l'article [1] qui est un modèle que l'on peut mettre en oeuvre avec les données dont on dispose à Sporttesting sous réserve de l'adapter un peu.

6.2 Premier modèle : modèle de Keller

Keller est l'un des premiers à s'être intéressé à l'optimisation d'une course pour une distance donnée. Pour cela, il a construit un modèle basé sur la seconde loi de Newton, le principe de conservation de l'énergie et des principes de physiologie. En effet, on peut découper l'énergie que l'on produit en 2 grandes catégories : l'énergie aérobie qui est majoritairement produite à partir de l'oxygène et l'énergie anaérobie qui est produite essentiellement à partir du glycogène et du lactate. Ici, on s'intéressera surtout à l'énergie anaérobie qu'on peut voir comme une réserve qui nous permet de produire de l'énergie, cette réserve diminue donc lors d'un effort assez intense quand le système aérobie ne suffit plus à produire l'énergie nécessaire, c'est-à-dire des efforts d'une intensité supérieure au SV1.

6.2.1 Le modèle en détails

On a un système d'équations couplées qui contient l'équation du mouvement et l'équation qui régit e_{an} (l'énergie anaérobie) :

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = f \\ \frac{de_{an}}{dt} = \bar{\sigma} - fv \end{cases}$$

où t désigne le temps, $v(t)$ la vitesse instantanée, $f(t)$ la force de propulsion, τ le coefficient de frottement de l'air, e_{an} le stock d'énergie anaérobie et $\bar{\sigma}$ la $VO2_{max}$.

On cherche à minimiser le temps T pour parcourir une certaine distance $D = \int_0^T v(t)dt$

avec pour contraintes :

$$0 \leq f(t) \leq f_{max} \quad , \quad v(t) \geq 0 \quad \text{et} \quad e_{an}(t) \geq 0$$

et comme conditions initiales : $v(0) = 0 \quad e_{an}(0) = e_{an}^0$

On remarquera que ce modèle ne prend pas en compte le dénivelé potentiel du parcours.

6.2.2 Simulations numériques du modèle de Keller

J'ai choisi d'utiliser Gekko (un solveur de problème de contrôle optimal) pour faire les simulations de ce modèle.

On réécrit un peu le problème pour simplifier les simulations :

Pour éviter les formules de quadrature, on reformule le problème en rajoutant une équation sur la distance :

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t) \quad \text{avec} \quad x(0) = 0 \quad \text{et} \quad x(T) = d$$

Pour simplifier le problème, on considère plutôt le problème de maximisation de la distance étant donné un temps T , cela revient à écrire le problème sous la forme :

$$MaxD = Min - D = Min - \int_0^T v(t)dt$$

On prendra pour exemple : $\bar{\sigma} = 41.56$, $f_{max} = 9$, $e_{an}^0 = 2409$ et $T = 106.01$ ce qui donne environ $d = 800$

Voici le code correspondant :

```

1 #Modele de Keller
2 m = GEKKO() # initialize GEKKO
3 nt = 2000
4 T = 106.01
5 m.time = np.linspace(0,T,nt)
6
7 # Variables
8 v = m.Var(value=0,lb=0)
9 ean = m.Var(value=2409,lb=0)
10 d = m.Var(value=0)
11
12 #Parametres
13 sigma = m.Param(value=41.56)
14 tau = m.Param(value=0.89)
15
16 p = np.zeros(nt) # mark final time point
17 p[-1] = 1.0
18 final = m.Param(value=p)
19
20 # control changes every time period
21 f = m.MV(value=9,lb=0,ub=9)
22 f.STATUS = 1
23 m.Equation(v.dt()+v/tau==f)
24 m.Equation(ean.dt()==(sigma-1*f*v))
25 m.Equation(d.dt() == -1*v)
26
27 m.Obj(final*d)
28 m.options.IMODE = 6
29 m.solve(disps=False)

```

Et on obtient :

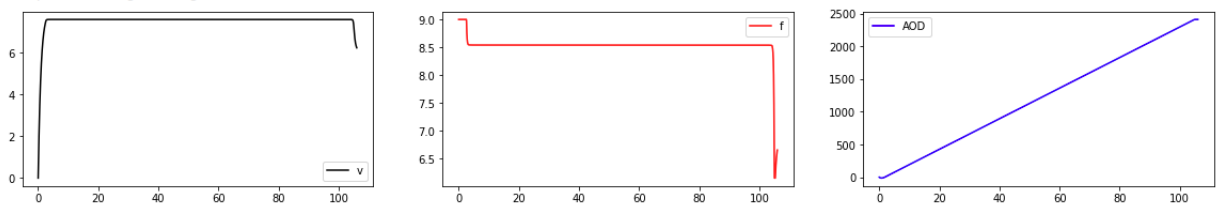


Figure 21: Modèle de Keller

On peut remarquer que la vitesse augmente rapidement au début et reste constante par la suite avant de chuter à la fin de la course, de plus l'AOD (accumulated oxygen deficit qui vaut $e_{an} - e_{an}^0$) décroît de manière linéaire. Ce modèle donne de bons résultats sur les temps de course mais ne permet pas d'établir une stratégie de course. En effet, il ne semble pas réaliste que le coureur maintienne une vitesse aussi constante et qu'il décélère à la toute fin de la course et puisse courir avec une énergie nulle (e_{an} vaut 0 à la fin de la course ici).

6.3 Amélioration du modèle de Keller

Le modèle de Keller n'est pas trop mauvais pour prédire un temps de course mais se révèle inefficace pour prédire une stratégie de course selon l'article [1], cela est dû au fait que la modélisation s'éloigne de la réalité physiologique sur certains points. En effet, ce modèle ne prend pas en compte la fatigue, c'est-à-dire que lorsque le stock d'énergie anaérobie est trop bas, il est impossible que la VO_2 soit à VO_{2max} , de plus au départ le coureur met entre 20 et 40 s avant d'atteindre VO_{2max} . Il faudrait donc prendre en compte ses faits physiologiques pour améliorer le problème. Nous avons abandonné l'étude de ce nouveau modèle car nous nous sommes rendus compte que sur de longues distances ces effets étaient négligeables et nous ne prévoyons pas de faire des prédictions sur des épreuves de moins de 10 km. De plus, ce modèle considère que la course est courue à VO_{2max} , ce qui n'est pas réaliste pour de longues distances. Pour chaque distance d'épreuve : 10 km, semi-marathon et marathon, nous allons définir un pourcentage de VO_{2max} qui se rapproche le plus de la réalité.

6.4 Détermination des paramètres physiologiques utiles au modèle

On utilisera le modèle de Keller auquel nous aurons apporté quelques modifications en ce qui concerne la VO_2 prise en compte dans son modèle. Pour mettre en oeuvre le modèle, nous avons besoin pour chaque coureur de 4 paramètres physiologiques : sa VO_{2max} ($\bar{\sigma}$), sa force de propulsion maximale (f_{max}), le coefficient de frottement de l'air (τ) et le stock d'énergie anaérobie initial (e_{an}^0).

La VO_{2max} est une valeur que nous mesurons lors de nos tests, il est donc facile d'avoir accès à cette valeur.

Pour la force de propulsion maximale et le coefficient de frottement de l'air, on adaptera la méthode proposée dans l'article [2]. On se basera essentiellement sur le test Wingate qui se rapproche le plus du test effectué dans l'article [2]. En effet, dans cet article, les auteurs proposent de faire un test de 80 m de course pour déterminer le profil de vitesse : $v(t) = f_{max}\tau(1 - \exp(-\frac{t}{\tau}))$. Comme nous ne disposons pas de plusieurs mesures de vitesse à des temps différents du test Wingate qui se rapproche le plus d'une course de 80 m en termes de capacités évaluer, on prendra la vitesse à la fin du test et celle au milieu du test en supposant que le coureur ait couru le test à vitesse constante. Ensuite, à partir de ces 2 couples de valeurs, on peut résoudre un système d'équations à 2 inconnus et ainsi obtenir des estimations pour les valeurs de f_{max} et τ .

Pour le stock d'énergie anaérobie, il s'agit d'une valeur assez compliquée à mesurer et la méthode proposée par l'article ne donne pas des résultats satisfaisants pour toutes les personnes. En effet, cette valeur varie beaucoup selon les individus et les valeurs critiques γ_1 et γ_2 prises dans l'article ne semblent pas marcher pour tous les individus et semblent difficiles à déterminer. La formule considérée dans l'article [2] est :

$$e_{an}^0 = \frac{1}{1-\gamma_1} [\bar{\sigma}(t_2 - t_1) + \gamma_2 - \frac{1}{2}(v^2(t_2) - v^2(t_1)) - \int_{t_2}^{t_1} \frac{v^2(s)}{\tau} ds]$$

Pour tester notre modèle, pour le moment on utilise cette formule mais on souhaiterait par la suite trouver une valeur plus proche de la réalité pour améliorer le modèle.

Voici un extrait du code correspondant à notre modèle actuel :

```
1 def calcul_distance(sigma_bar,fmax,tau,e0,T,nb_points_t):
2     m = GEKKO() # initialize GEKKO
3     nt = nb_points_t
4     T = T
5     m.time = np.linspace(0,T,nt)
6
7     # Variables
8     v = m.Var(value=0,lb=0)
9     ean = m.Var(value=e0,lb=0)
10    d = m.Var(value=0)
11
12    #Paramètres
13    sigma = m.Param(value=sigma_bar)
```

```

14 tau = m.Param(value=tau)
15
16
17 p = np.zeros(nt) # mark final time point
18 p[-1] = 1.0
19 final = m.Param(value=p)
20
21
22 # control changes every time period
23 f = m.MV(value=fmax, lb=0, ub=fmax)
24 f.STATUS = 1
25 m.Equation(v.dt()+v/tau==f)
26 m.Equation(ean.dt()==(sigma-1*f*v))
27 m.Equation(d.dt() == -1*v)
28
29
30 m.Obj(final*d)
31 m.options.IMODE = 6
32 m.solve(dis=False)
33
34 return(-1*d.value[-1])

```

6.5 Tests du modèle de Keller sur différents athlètes

J'ai testé ce modèle pour plusieurs athlètes et sur des distances différentes. Nous n'avons pas pu le tester sur davantage de personne car soit il nous manquait les données nécessaires au modèle soit nous ne disposions pas de temps de performance suffisamment proche en termes de date du test physiologique, ce qui fausserait les résultats des prédictions. Dans ces individus, il y a 3 hommes et une femme (nous n'avons pas pu respecter la parité dans nos tests car nous ne disposions pas d'autres tests physiologiques sur une femme dont nous avons des temps de performance). Ces individus ont des niveaux assez différents, on a à la fois des sportifs de haut niveau et amateurs.

- Pour l'athlète 1, son temps au marathon est de 3 h 34 et le modèle nous donne un temps de 3 h 39 min et 50 s.
- Pour l'athlète 2, son temps au 10 km est de 29 min 22 s et le modèle nous donne un temps de 39 min 35 s.
- Pour l'athlète 3, son temps au 10 km est de 29 min 44 s et le modèle nous donne un temps de 37 min 34 s.
- Pour l'athlète 4, son temps au marathon est de 4 h et le modèle nous donne un temps de 3 h 35 min et 34 s.

Si on calcule l'erreur relative pour ces 4 athlètes, cela donne 0.03 pour l'athlète 1, 0.34 pour l'athlète 2, 0.36 pour l'athlète 3 et 0.1 pour l'athlète 4. On a donc une erreur moyenne de 0.18. Les erreurs sont plus au moins grandes selon les athlètes, cela peut être dû au choix de stratégie (mauvaise gestion de l'effort) et à l'aspect psychologique qui n'est pas pris en compte ici et qui peuvent amener une différence entre le temps prédit et le temps réel. L'erreur est plus importante pour les athlètes de haut niveau que pour les athlètes amateurs et l'erreur est plus faible pour le marathon que pour le 10 km. Il est donc difficile de dire si ce qui influence le plus l'erreur est la distance ou le niveau de l'athlète. Pour cela, il aurait fallu pouvoir tester des athlètes amateurs et de haut niveau sur des distances courtes et longues.

6.6 Amélioration du modèle

Le modèle donne des résultats plus ou moins bons selon les individus. Une des hypothèses est que le stock d'énergie anaérobie n'est pas bien déterminée, les paramètres γ_1 et γ_2 sont justes pour la moyenne des personnes mais ne prennent pas en compte que chaque individu est différent. Après plusieurs tentatives pour déterminer le stock d'énergie anaérobie (comme tracer le stock d'énergie anaérobie en fonction du temps de course réel et des autres paramètres), il semble que cette variable soit difficile à déterminer précisément avec les données que nous avons et qu'elle n'est pas possible à mesurer avec les tests que nous réalisons à Sporttesting. Ce modèle semble être plus adapté aux épreuves de demi-fond (ce qui a été testé dans l'article [1] et qui donnait de bons résultats) que de fond (distance supérieure à 5 km). De plus, avec l'évolution des protocoles de test (on ne dispose plus pour tous les tests course à pied de la distance du test Wingate essentiel au modèle), nous avons décidé d'arrêter de développer ce modèle de prédiction de performance qui n'était plus adapté. Les autres modèles n'étant pas utilisables avec nos données, il aurait fallu créer notre propre modèle de prédiction de performance, ce qui n'était pas possible au vu du temps imparti qui nous restait (seulement 2 mois).

7 Analyse des données du CNSNMM

Le CNSNMM (Centre National de Ski Nordique et de Moyenne Montagne) est un établissement public qui a pour missions principales la recherche dans le domaine de l'optimisation, le suivi de la performance et l'entraînement de haut niveau en ski nordique (il est le centre d'entraînement des équipes de France en ski nordique).

Compte tenu de la fermeture de Sporttesting en juin 2022, j'ai travaillé sur les données du CNSNMM durant mon dernier mois de stage. J'ai eu l'occasion d'accéder à ses données grâce à mon tuteur de stage qui est responsable scientifique au CNSNMM en plus d'être le président de Sporttesting.

L'objectif est de calculer certains indicateurs de performance tels que la VO2max, la consommation des lipides en fonction de l'intensité de l'effort puis d'analyser la répartition de ceux-ci pour définir des normes et ainsi pouvoir situer les athlètes par rapport à ses normes. Actuellement, les études sur ces normes prennent en compte peu de sujets, c'est-à-dire une dizaine en général, ce qui permettra de mettre à disposition des sport scientist des normes faites sur un plus grand échantillon.

On dispose de 600 tests VO2max réalisés essentiellement sur des skieurs de fond durant les 20 dernières années au CNSNMM.

Voici un extrait des données d'un test VO2 du CNSNMM :

t	FR	VE (BTPS)	VO2 (STPD)	VCO2	VO2/kg	PetO2	PetCO2	QR	VE/VO2	VE/VCO2	FC	BR	VT (BTPS)
hh:mm:ss	l/min	l/min	l/min	l/min	ml/min/kg	mmHg	mmHg				1/min		l
00:00:10	0.0	0.0	0.000	0.000	0	-	-	0.00	0.0	0.0	0	125	0.00
00:00:20	6.9	2.4	0.078	0.052	1	-	-	0.67	22.1	33.1	31	123	0.34
00:00:30	15.6	9.9	0.424	0.278	6	-	-	0.66	20.0	30.5	59	115	0.64
00:00:40	22.6	22.6	1.102	0.721	15	-	-	0.65	18.6	28.4	83	102	1.00
00:00:50	23.9	24.3	1.145	0.786	15	-	-	0.69	19.3	28.1	75	101	1.02
00:01:00	24.9	23.6	0.975	0.722	13	-	-	0.74	21.8	29.5	68	101	0.95
00:01:10	27.1	22.6	0.844	0.657	11	-	-	0.78	23.8	30.6	64	102	0.84
00:01:20	28.9	22.5	0.767	0.628	10	-	-	0.82	25.8	31.5	61	102	0.78
00:01:30	28.3	20.9	0.660	0.549	9	-	-	0.83	27.6	33.1	60	104	0.74
00:01:40	31.1	23.7	0.809	0.657	11	-	-	0.81	25.6	31.5	60	101	0.76
00:01:50	30.3	20.9	0.718	0.593	10	-	-	0.83	25.1	30.4	59	104	0.69
00:02:00	30.2	26.4	0.938	0.788	13	-	-	0.84	25.1	29.9	60	99	0.87
00:02:10	25.1	21.6	0.722	0.627	10	-	-	0.87	26.7	30.7	60	103	0.86
00:02:20	26.2	23.0	0.739	0.654	10	-	-	0.89	27.8	31.5	61	102	0.88
00:02:30	23.5	20.0	0.644	0.571	9	-	-	0.89	27.6	31.2	62	105	0.85
00:02:40	29.0	23.7	0.745	0.660	10	-	-	0.89	28.2	31.8	63	101	0.82
00:02:50	25.9	24.0	0.716	0.610	10	-	-	0.85	30.1	35.3	63	101	0.93
00:03:00	32.3	25.3	0.864	0.717	12	-	-	0.83	25.8	31.1	63	100	0.78
00:03:10	29.4	24.0	0.799	0.662	11	-	-	0.83	26.6	32.1	63	101	0.82
00:03:20	28.3	21.1	0.761	0.601	10	-	-	0.79	24.2	30.7	64	104	0.75
00:03:30	27.8	22.8	0.878	0.697	12	-	-	0.79	23.0	29.0	67	102	0.82
00:03:40	28.2	25.4	0.885	0.755	12	-	-	0.85	25.7	30.2	71	100	0.90
00:03:50	30.3	26.2	0.864	0.767	12	-	-	0.89	27.0	30.4	76	99	0.86
00:04:00	27.2	24.3	0.806	0.690	11	-	-	0.86	26.9	31.5	77	101	0.89
00:04:10	28.1	22.6	0.843	0.664	11	-	-	0.79	23.7	30.1	77	102	0.81
00:04:20	28.0	21.9	0.888	0.661	12	-	-	0.74	21.7	29.2	76	103	0.78
00:04:30	26.3	22.8	1.019	0.753	14	-	-	0.74	19.9	27.0	76	102	0.87
00:04:40	22.9	24.4	1.053	0.814	14	-	-	0.77	21.1	27.3	77	101	1.07
00:04:50	23.5	27.7	1.150	0.923	16	-	-	0.80	22.1	27.6	78	97	1.18

Figure 22: Extrait des données CNSNMM

On remarque que ces données ressemblent en termes de forme aux tests VO2 de Sporttesting, ce qui est tout à fait normal compte tenu du fait qu'ils ont été réalisés avec le même matériel et exportés avec le même logiciel. On s'intéressera aux mêmes colonnes que dans les tests VO2 de Sporttesting.

Comme les fichiers de ces tests sont au format xml, on commencera par les convertir en dataframe pour les traiter plus facilement. On les nettoiera ensuite avant de les exploiter : on enlève les doublons, les tests qui sont trop courts (inférieurs à 15 min) ou trop longs (supérieurs à 50 min). On mettra aussi les données de temps au bon format (temps en s plutôt qu'en format horaire). Pour finir, si la VO2 absolue n'est pas supérieure de 2.25, on considérera que le test était raté et on ne le prendra pas en compte pour les analyses.

On calcule ensuite des indicateurs physiologiques : la VO2max, la FCmax, le ratio VO2max/FCmax, le VE-max, et la consommation de lipide à 40,50,60,70,80,90 et 100 % de VO2max. On trace les histogrammes

correspondant pour avoir les normes correspondantes qui seront utiles aux sport scientist pour analyser les résultats des tests et permettre de comparer l'athlète aux autres.

On génère un rapport sur les différentes variables qui nous intéressent sous le format d'une page HTML grâce à panda profiling qui donne accès aux statistiques de manière simple et interactive.

Voici un extrait des histogrammes qu'on obtient :

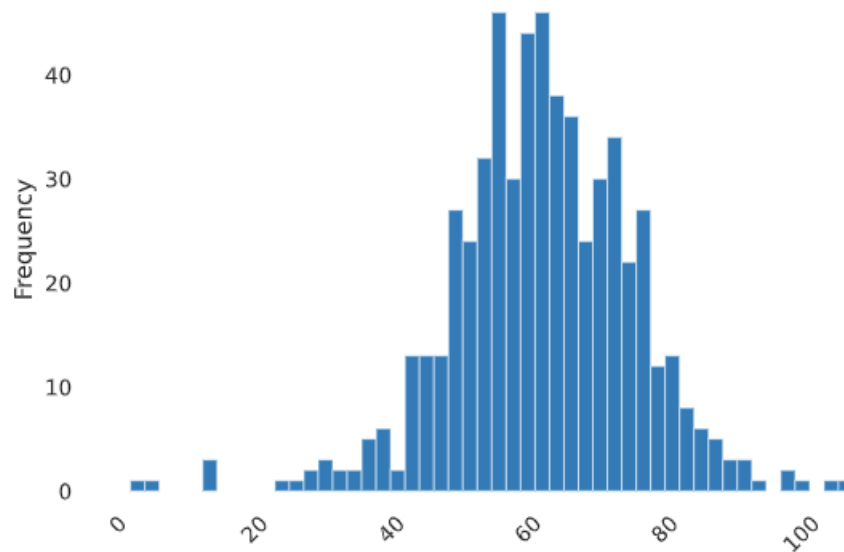


Figure 23: Histogramme de la VO2max

On remarquera que l'on n'a pas distingué les hommes des femmes car nous n'avions pas l'information dans les fichiers et pas de moyen de la déduire avec les données dont on disposait. Les statistiques sont donc homme et femme confondus.

Par exemple, si une personne a une VO2max de 80, on peut considérer qu'elle est supérieure à beaucoup de gens donc qu'elle a une très bonne VO2max.

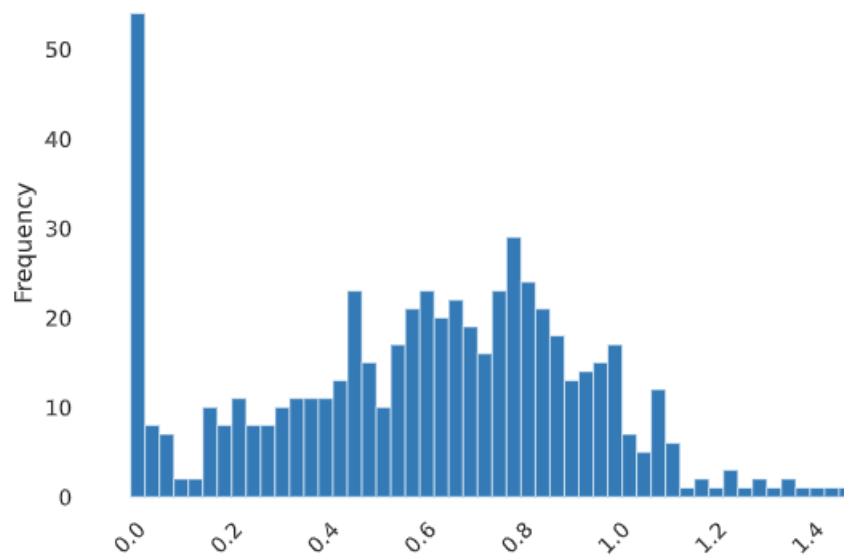


Figure 24: Histogramme de la consommation de lipides à 40 % de VO2max

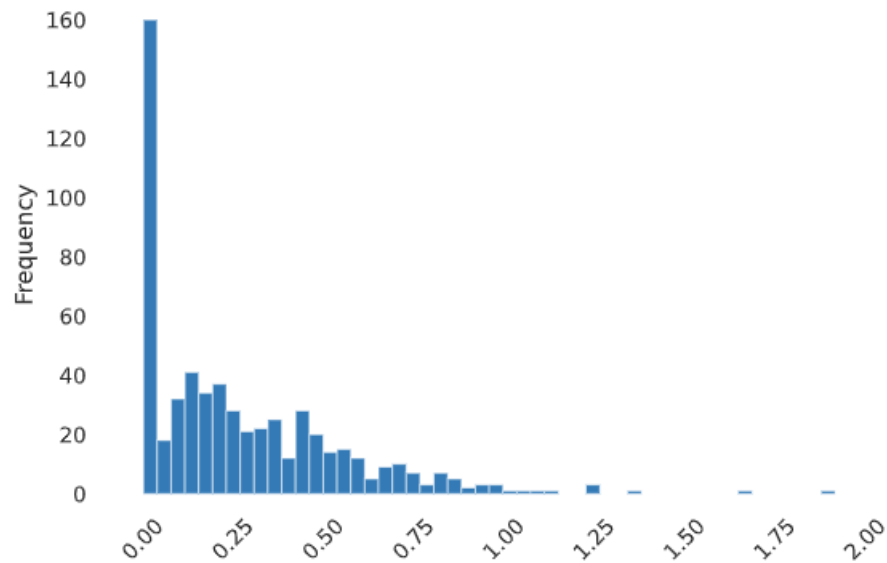


Figure 25: Histogramme de la consommation de lipides à 70 % de VO2max

On observe que la consommation de lipides vaut 0 chez un plus grand nombre de personnes à 70 % de VO2max qu'à 40 %. Cela est dû au fait que plus l'intensité est élevée, plus la consommation de lipides a tendance à baisser. C'est bien ce que l'on observe en regardant ses graphes (baisse globale de la consommation de lipides à 70 % par rapport à 40 % de VO2max).

Plus une personne est capable d'utiliser ses lipides à un haut pourcentage de VO2max, plus elle épargne ses stocks de glycogène qui sont un facteur limitant à la performance. Par exemple, si une personne consomme 0.5 g/min de lipides à 70 % de VO2max, cela veut dire que pour un effort de cette intensité, elle consomme plus de lipides que la majorité des autres athlètes et elle aura plus de chance de faire une meilleure performance que les autres.

8 Conclusion

Grâce à ce stage, j'ai eu l'occasion de mettre en œuvre différentes méthodes vues en cours et d'en apprendre de nouvelles comme les techniques de nettoyage de données. J'ai aussi découvert la régression par spline qui se révèle très utile quand nos données ne sont pas très lisses et ne correspondent à aucun autre modèle classique. J'ai aussi amélioré ma maîtrise de langage Python grâce à une pratique quasi journalière pendant 6 mois.

Adaptabilité et autonomie sont les 2 mots d'ordres que je retiens du travail dans une start up. En effet, j'ai dû m'adapter à des stratégies et des projets qui peuvent changer de direction régulièrement et très rapidement. J'ai aussi dû faire preuve d'autonomie pour organiser les projets et mon propre travail. Il a fallu également construire des stratégies pour mener au mieux les projets en fonction des moyens du bord. J'ai appris qu'il ne faut pas hésiter à prendre des initiatives et proposer des projets en adéquation avec les besoins de l'entreprise. J'ai dû aussi essayer de comprendre et de répondre aux attentes de l'entreprise en ne cherchant pas toujours à faire des choses compliquées car des fois les choses simples se révèlent les plus utiles. Je me suis beaucoup intéressée à la physiologie et avec le recul, cela était essentiel pour travailler sur ces données qui étaient au cœur de Sporttesting. Et pour finir, j'ajouterais qu'il m'a fallu savoir rebondir face aux situations les plus inattendues, comme la fermeture définitive de Sporttesting, et alors trouver une issue aux problèmes qui semblent les plus insolubles.

9 Lexique

- **VO2max** : le VO2max est la capacité intégrée maximale des systèmes respiratoire, cardiovasculaire et musculaire à absorber, transporter et utiliser l'oxygène, respectivement. C'est le débit maximal de consommation d'oxygène.
- **SV1** : le seuil 1 marque l'intensité où la glycolyse commence à apporter une plus grande contribution à la production d'énergie, car la filière oxydative seule ne peut pas produire l'énergie requise assez rapidement. Du lactate commence à être produit mais il est bien recyclé.
- **SV2** : le seuil 2 est l'intensité la plus élevée qui peut être maintenue dans un état stable. Au-dessus de cette intensité, la production de lactate est supérieure à son recyclage.
- **PMA/VMA** : puissance Maximale Aérobie ou Vitesse Maximale Aérobie. Correspond à l'intensité à laquelle la consommation d'oxygène est maximale (VO2max).
- **FCmax** : la fréquence cardiaque maximale (FC max) indique le nombre maximum de battements que le cœur réalise en une minute.
- **HRR1** : récupération en bpm (battement par minutes) 1 min après la fin du test VO2. Il renseigne sur la capacité de récupération de la fréquence cardiaque.
- **HRR2** : récupération en bpm (battement par minutes) 2 min après la fin du test VO2. Il renseigne sur l'état de forme global du jour.
- **HRR3** : récupération en bpm (battement par minutes) 3 min après la fin du test VO2. Il renseigne sur la capacité aérobie, la capacité à être endurant.
- **HRRP** : % de FC max au plateau de récupération. Cela indique la capacité de l'organisme à revenir à l'état basal.
- **Clairance du lactate** : la clairance est la capacité de l'organisme à éliminer/recycler une substance dans le sang. La clairance du lactate correspond donc à la capacité de l'organisme à éliminer/recycler le lactate.
- **Volume pulmonaire** : Le volume d'air expiré au cours d'une expiration forcée de 6 secondes effectuée après une inspiration maximale. Appelée aussi Capacité Vitale Forcée (CVF).
- **Puissance expiratoire** : Le volume d'air expiré au cours d'une expiration forcée de 1sec effectuée après une inspiration maximale. Aussi appelé Volume Expiré Forcé (VEF).
- **Ratio puissance/volume** : Le % d'air expiré pendant la première seconde du volume pulmonaire (CVF). Sa valeur normale est égale ou supérieure à 80 %.
- **Débit ventilatoire maximum (VEmax)** : Le débit ventilatoire max est le volume d'air mobilisé par les poumons par minute. C'est la fréquence respiratoire multipliée par le volume courant. C'est une indication de la fonction respiratoire, durant l'exercice.
- **Fréquence respiratoire maximum** : Nombre de cycles complet de respiration par minute.
- **Volume courant maximum (VTmax)** : Volume d'air mobilisé sur un cycle de respiration
- **Coefficient d'utilisation pulmonaire** : Différence entre volume courant max et le volume pulmonaire. Cet indicateur permet de mesurer l'utilisation du volume pulmonaire pendant l'effort.
- **VO2 repos** : La VO2 au repos indique la consommation d'énergie au repos. C'est un indicateur du métabolisme basal.

- **VO2 max par kg poids de corps** : La VO2max relative au poids de corps est la valeur de référence en physiologie de l'exercice. La VO2max est la capacité intégrée maximale des systèmes respiratoire, cardiovasculaire et musculaire à absorber, transporter et utiliser l'oxygène, respectivement. C'est le débit maximal de consommation d'oxygène.
- **Distance Wingate** : Distance parcourue sur une course de 30 secondes à allure maximale, sans gestion. Ce test permet d'évaluer les qualités d'explosivité.
- **Puissance Wingate** : Puissance développée sur un test maximal de 30 secondes, sans gestion. Ce test permet d'évaluer les qualités d'explosivité.
- **Fatigue index** : Le fatigue index permet d'évaluer la capacité explosive, à quel point vous pouvez maintenir un niveau de puissance élevé.
- **Plateau VO2max** : À partir de la VO2max, la demande en oxygène augmente mais la consommation stagne, c'est le plateau de VO2max. À partir de cette intensité, le système passe en dette d'énergie. L'énergie utilisée pour répondre à l'intensité qui continue d'augmenter se fait uniquement via la filière anaérobie (filière glycolytique). La fatigue ainsi que le manque de substrat énergétique vont finalement contraindre le sportif à stopper ou baisser l'intensité de son effort. La durée du plateau de VO2max est un marqueur de performance du sportif, il peut représenter les qualités anaérobies liées à la filière glycolytique du sportif, c'est-à-dire la capacité et l'endurance anaérobie.
- **Puissance glycolitique** : La puissance glycolytique est calculée à partir des mesures de lactatémie (avant et après le test Wingate). Cette mesure nous donne un aperçu des qualités de production d'énergie à partir de la glycolyse.
- **Vlamax** : Le VLaMax est le débit maximal à laquelle l'énergie peut être produite par la glycolyse.
- **Fatmax** : Fatmax marque l'intensité où le taux d'oxydation des graisses (consommation des lipides) est le plus élevé.
- **Carbmax** : Carbmax marque l'intensité à laquelle la combustion des glucides atteint 65 g, 70 g, 80 g ou 90 g par heure (taux maximal d'absorption des glucides par l'organisme), selon le niveau (respectivement : amateur, régional, national et international). Ainsi, à cette intensité, le corps est capable de régénérer les stocks de glucides au cours de l'effort, si et seulement si les apports glucidiques sont pertinents.
- **Rendement brut (cyclisme)** : Le rendement brut est le rapport entre le travail généré et le coût total de l'énergie métabolique. Cette mesure permet de savoir quelle part de l'énergie dépensée totale est transformée en puissance mécanique. En d'autres termes, à quel point vous êtes efficace. L'énergie qui n'est pas transformée en puissance mécanique est perdue sous forme de chaleur. Par exemple : si votre rendement brut est de 25% à SV1 et que votre SV1 est à 200 watts, rouler à 200 watts sur le vélo nécessitera en fait que votre corps dépense l'équivalent de 800 watts.
- **Economie (course à pied)** : L'économie de course est la consommation d'énergie associée à une vitesse. En effet, à une même intensité, deux sportifs peuvent avoir une consommation d'énergie différente. Ainsi, certains sportifs sont plus économes que d'autres, ils peuvent donc réaliser de meilleures performances. On compare souvent l'économie de course à la consommation d'essence d'une voiture. Une voiture est économique si elle a une faible consommation au 100 km, peu importe la taille de son réservoir ou la puissance de son moteur.
- **Métabolisme basal** : Consommation énergétique de base pour le fonctionnement du corps au repos : coeur, cerveau, respiration, digestion, maintien de la température du corps.
- **Indice d'activité métabolique** : L'Indice d'Activité Métabolique renseigne l'état de la vitalité cellulaire ou de la perméabilité membranaire. Il indique la capacité du corps à éliminer/drainer les déchets.

- **Masse cellulaire active** : Reflète l'hygiène de vie globale : sommeil, alimentation, activité physique.
- **Index masse musculaire** : Permet d'estimer la masse musculaire de l'organisme. Elle est composée majoritairement d'eau et de protéines. Les variations de cet index sont donc à mettre en relation avec les variations hydriques.
- **Contenu minéral osseux** : Indice qui permet d'estimer la qualité osseuse.
- **Eau extracellulaire** : Représente la réserve d'eau présente à l'extérieur des cellules qui n'est pas encore passée à l'intérieur.
- **Eau intracellulaire** : Représente l'eau à l'intérieur des cellules, utilisée pour leur fonctionnement, la production
- **Hydratation du corps** : Représente le pourcentage d'eau contenu dans l'organisme par rapport à la masse non grasse.

References

- [1] Amandine Aftalion, J. Frederic Bonnans. Optimization of running strategies based on anaerobic energy and variations of velocity. [Research Report] RR-8344, 2013, pp.22.
- [2] Amandine Aftalion, Louis-Henri Despaigne, Alexis Frentz, Pierre Gabet, Antoine Lajouanie, Marc-Antoine Lorthiois, Lucien Roquette Camille Vernet. How to identify the physiological parameters and run the optimal race.
- [3] Daniel A. Keir, Danilo Iannetta, Felipe Mattioni Maturana, John M. Kowalchuk, Juan M. Murias. Identification of Non-Invasive Exercise Thresholds: Methods, Strategies, and an Online App, 2021