

Thème : Biomécanique (2)

2. La propulsion

La propulsion en vélo tout terrain est la résultante de forces opposées : des forces internes qui entraînent le couple homme - machine, des forces externes qui le freinent (résistances à l'avancement).

Les forces internes sont développées par des contractions musculaires, qui transforment de l'énergie chimique en énergie mécanique. Ces contractions consistent essentiellement en un pédalage des membres inférieurs. Ce pédalage transmet la force propulsive par le système pédale – manivelle – plateau – chaîne – pignon - roue arrière. Le vététiste utilise donc des mouvements de rotation (pédalage) pour créer et entretenir un mouvement de translation vers l'avant.

2.1 Facteurs qui déterminent la vitesse de déplacement

- **La fréquence de pédalage** : elle s'exprime en répétitions par minutes (rpm). Sur terrain plat, la fréquence de pédalage optimale se situe entre 80 et 110 rpm.
- **Le développement adopté** : il s'agit de la distance parcourue par le couple homme machine pour un tour complet de pédalier. Il varie en fonction du diamètre de la roue arrière, et du braquet utilisé, c-a-d le nombre de dents du plateau avant sur le nombre de dents du pignon arrière. La formule suivante permet de calculer le développement :

$$\text{Développement} = \text{Diamètre de la roue} \times 3.14 \times \frac{\text{nombre de dents du plateau}}{\text{nombre de dents du pignon}}$$

Remarque : les plateaux du pédalier d'un VTT sont généralement de 44/32/22 dents et la roue libre échelonne des pignons qui vont de 11 à 34 dents.

Les vélos de route sont équipés de roues de 700 dont le diamètre varie en réalité de 670 à 680 mm selon le type de boyau ou de pneu utilisé. Les vélos de VTT sont munis de roues de 650 ou de 26 pouces et ceux de bicross de 20 et 24 pouces (1 pouce = 254 mm).

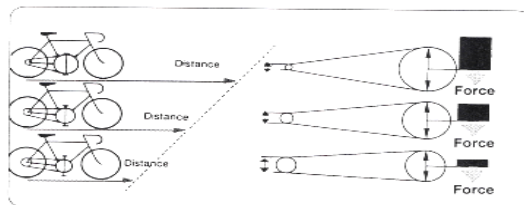
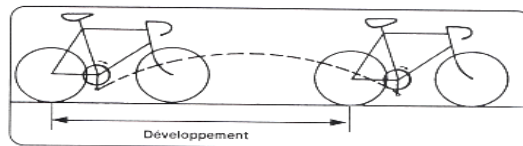
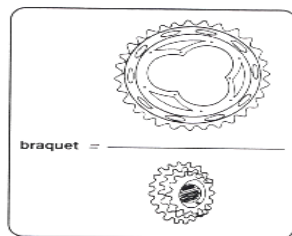


Tableau des développements roue de 650 mm (vélo tout terrain)

Dents des plateaux

	22	24	26	28	30	32	34	36	38	39	40	41	42	44	46	48	50	51	52	
D	11	4,1	4,5	4,8	5,2	5,6	5,9	6,3	6,7	7,1	7,2	7,4	7,6	7,8	8,2	8,5	8,9	9,3	9,5	9,6
e	12	3,7	4,1	4,4	4,8	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,6	6,8	7,0	7,1	7,5	7,8	8,2	8,5	8,7	8,8
n	13	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5,0	5,3	5,7	6,0	6,1	6,3	6,4	6,6	6,9	7,2	7,5	7,9	8,0	8,2
t	14	3,2	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5,0	5,2	5,5	5,7	5,8	6,0	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,4	7,6
s	15	3,0	3,3	3,5	3,8	4,1	4,4	4,6	4,9	5,2	5,3	5,4	5,6	5,7	6,0	6,3	6,5	6,8	6,9	7,1
p	16	2,8	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,8	5,0	5,1	5,2	5,4	5,6	5,9	6,1	6,4	6,5	6,6
i	17	2,6	2,9	3,1	3,4	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,3	5,5	5,8	6,0	6,1	6,2
g	18	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4	3,6	3,9	4,1	4,3	4,4	4,5	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,7	5,8	5,9
n	19	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,2	5,4	5,5	5,6
o	20	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,2	5,3
s	21	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,0	5,1
	22	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,3	4,5	4,6	4,7	4,8
	23	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,9	4,1	4,3	4,4	4,5	4,6
	24	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,9	4,1	4,3	4,3	4,4
	26	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1
	28	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
	30	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,5
	32	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,3
	34	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1
	36	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9

Tableau des développements roue de 680 mm (vélo de route)

Dents des plateaux

	30	32	34	36	38	39	40	41	42	43	44	45	46	48	49	50	51	52	53	54	55	56	
D	11	5,8	6,2	6,6	6,9	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,7	8,9	9,2	9,4	9,6	9,8	10,0	10,2	10,4	10,6	10,8
e	12	5,3	5,7	6,0	6,4	6,7	6,9	7,1	7,2	7,4	7,6	7,8	7,9	8,1	8,5	8,7	8,8	9,0	9,2	9,4	9,5	9,7	9,9
n	13	4,9	5,2	5,5	5,9	6,2	6,4	6,5	6,7	6,8	7,0	7,2	7,3	7,5	7,8	8,0	8,2	8,3	8,5	8,6	8,8	9,0	9,1
t	14	4,5	4,8	5,1	5,5	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,5	6,7	6,8	7,0	7,3	7,4	7,6	7,7	7,9	8,0	8,2	8,3	8,5
s	15	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	5,5	5,7	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,5	6,8	6,9	7,1	7,2	7,3	7,5	7,6	7,8	7,9
p	16	4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,2	5,3	5,4	5,6	5,7	5,8	6,0	6,1	6,4	6,5	6,6	6,8	6,9	7,0	7,2	7,3	7,4
i	17	3,7	4,0	4,2	4,5	4,7	4,9	5,0	5,1	5,2	5,4	5,5	5,6	5,7	6,0	6,1	6,2	6,4	6,5	6,6	6,7	6,9	7,0
g	18	3,5	3,8	4,0	4,2	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,4	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,4	6,5	6,6
n	19	3,3	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2
o	20	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9
s	21	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,7
	22	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4
	23	2,8	2,9	3,1	3,3	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,1	4,2	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2
	24	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	4,9
	25	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,7
	26	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,7	3,9	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
	28	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,1	4,2	4,2
	30	2,1	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,9	4,0

Vitesse en km/h donnée par la relation entre développement et cadence de pédalage
Développement en mètres

	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	11	11	
C a d e n c e d e p é d a l i s a g e	50	6	7,5	9	11	12	14	15	17	18	20	21	23	24	26	27	29	30	32	33
	55	6,6	8,3	9,9	12	13	15	17	18	20	21	23	25	26	28	30	31	33	35	36
	60	7,2	9	11	13	14	16	18	20	22	23	25	27	29	31	32	34	36	38	40
	65	7,8	9,8	12	14	16	18	20	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43
	70	8,4	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	32	34	36	38	40	42	44	46
	75	9	11	14	16	18	20	23	25	27	29	32	34	36	38	41	43	45	47	50
	80	9,6	12	14	17	19	22	24	26	29	31	34	36	38	41	43	46	48	50	53
	85	10	13	15	18	20	23	26	28	31	33	36	38	41	43	46	48	51	54	56
	90	11	14	16	19	22	24	27	30	32	35	38	41	43	46	49	51	54	57	59
	95	11	14	17	20	23	26	29	31	34	37	40	43	46	48	51	54	57	60	63
	100	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66
	105	13	16	19	22	25	28	32	35	38	41	44	47	50	54	57	60	63	66	69
	110	13	17	20	23	26	30	33	36	40	43	46	50	53	56	59	63	66	69	73
	115	14	17	21	24	28	31	35	38	41	45	48	52	55	59	62	66	69	72	76
	120	14	18	22	25	29	32	36	40	43	47	50	54	58	61	65	68	72	76	79
	125	15	19	23	26	30	34	38	41	45	49	53	56	60	64	68	71	75	79	83
	130	16	20	23	27	31	35	39	43	47	51	55	59	62	66	70	74	78	82	86
	135	16	20	24	28	32	36	41	45	49	53	57	61	65	69	73	77	81	85	89
	140	17	21	25	29	34	38	42	46	50	55	59	63	67	71	76	80	84	88	92
	145	17	22	26	30	35	39	44	48	52	57	61	65	70	74	78	83	87	91	96
150	18	23	27	32	36	41	45	50	54	59	63	68	72	77	81	86	90	95	99	
155	19	23	28	33	37	42	47	51	56	60	65	70	74	79	84	88	93	98	102	
160	19	24	29	34	38	43	48	53	58	62	67	72	77	82	86	91	96	101	106	

- **La longueur des manivelles** : les manivelles jouent un rôle de levier. Pour une même fréquence de pédalage et un braquet identique, le vététiste qui utilise des manivelles plus longues, diminue les forces qu’il exerce sur les pédales. En revanche le chemin parcouru par les pieds est plus long donc la fréquence de pédalage est plus faible. La longueur des manivelles varie entre 170 et 175 mm.

Conséquences pédagogiques : l’utilisation du braquet pour changer le développement doit faire l’objet d’un apprentissage. Cet apprentissage concerne à la fois le bon usage **technique** des dérailleurs avant et arrière grâce aux commandes (ne pas dérailer), et le **choix** du changement de braquet (quand changer ? quel rapport adopté ?). D’une façon générale, les situations d’apprentissage valorisent la notion de choix pour comprendre l’utilité du braquet (technique fonctionnelle) :

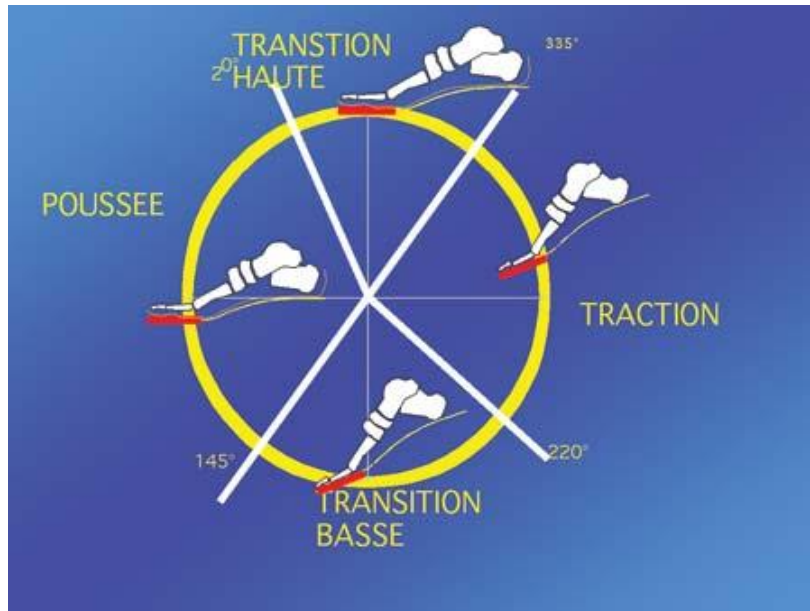
- faire le plus grand nombre de tours de pédales sur une distance donnée en ligne droite (20 à 50m),
- faire le plus petit nombre de tours de pédales sur une distance donnée en ligne droite (20 à 50m),
- sprints courts départ arrêté en variant les distances (de 5 à 20m),
- exercice de type montée impossible,
- circuit court avec des dénivelés différents pour inciter au changement fréquent de braquet.

2.2 Biomécanique du pédalage

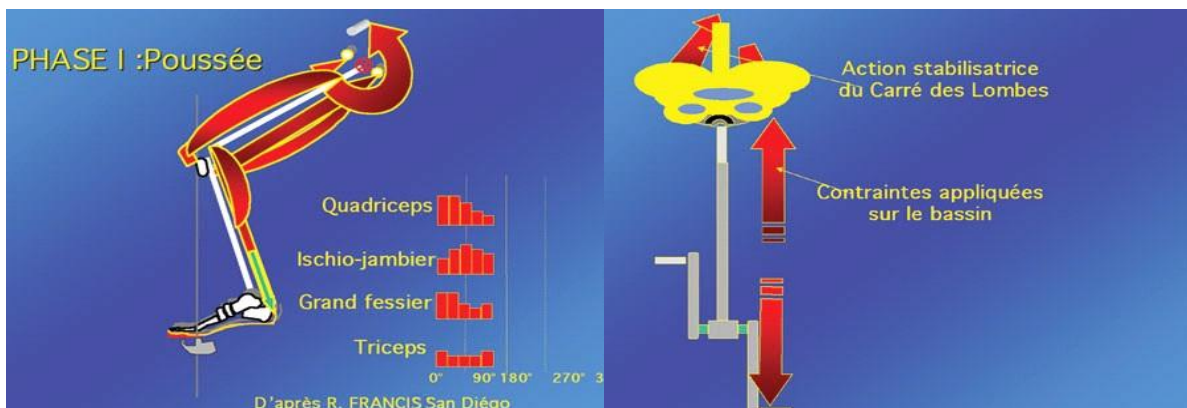
Préambule sur la notion d’efficacité → parallèle avec la course à pied et l’efficacité technique de la foulée (études de Bar-Or). Il ne suffit pas de développer une force importante (dimension bioénergétique), il faut aussi l’orienter efficacement (dimension biomécanique et

technique) sans quoi il advient une perte de travail mécanique. Il existe aussi une efficacité technique du pédalage qui conditionne sensiblement la performance !

Le mouvement de pédalage est un mouvement non naturel et très complexe dont dépend l'efficacité du déplacement à vélo (c'est à dire la combinaison de l'efficacité et de l'économie). On peut le décrire en **4 phases** qui s'enchaînent de façon dynamique. Il n'existe pas de points morts, mais des zones de moindre efficacité (ou zones de transition). Ce cycle de pédalage permet, pour chaque groupe musculaire, l'alternance de phases de travail et de récupération.



Phase 1 (de 20° à 145°) = phase de poussée. C'est la plus rentable sur le plan biomécanique et la plus instinctive. La phase de poussée correspond à une extension active de la hanche associée à une extension active du genou. Durant la phase de poussée, le bassin doit être fixé par des stabilisateurs (abdominaux, carré des lombes).

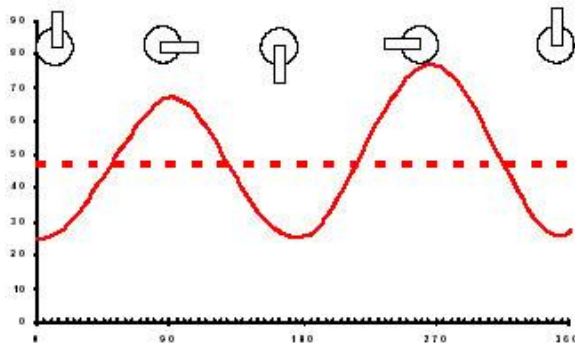


Phase 2 (de 145° à 220°) = phase de transition basse. Elle assure la transition entre la phase de poussée et la phase de traction. L'extension de hanche se poursuit, mais est maintenant associée à un début de flexion active du genou. L'action des ischio-jambiers et du triceps est prépondérante pour conserver l'énergie cinétique accumulée lors de la phase de descente de la pédale. La cheville est en flexion plantaire de quelques degrés. Cette phase doit s'enchaîner de la façon la plus souple et coordonnée avec la phase qui la précède et celle qui la suit.

Phase 3 (de 220° à 325°) = phase de traction. C'est la phase la moins instinctive du pédalage. Elle n'est possible que sur les vélos équipés de cale-pieds ou mieux, de pédales automatiques. La traction est réalisée par une flexion active de hanche et de genou. La flexion de hanche est due à l'action du psoas iliaque, du couturier et des muscles abdominaux. La flexion de genou est essentiellement due aux ischio-jambiers, qui se contractent de façon concentrique. C'est une phase de relâchement et de récupération pour le quadriceps et le triceps et tout le segment jambier (on ne retrouve quasiment aucune activité musculaire au-dessous du genou). Cette traction se déroule alors que le membre inférieur controlatéral est en phase de poussée. Elle joue donc un rôle d'épargne du quadriceps et de l'éventail fessier controlatéraux. Comme pour la phase de poussée, il est essentiel que le bassin constitue un point fixe.

Phase 4 (325° à 20°) = phase de transition haute. Elle permet de remettre le membre inférieur en position de poussée. C'est la seule phase où interviennent les releveurs du pied. Elle consiste à faire tourner la manivelle avec flexion dorsale du pied comme si la pointe du pied donnait un « coup de pied ».

NB : pour toutes ces phases, les muscles stabilisateurs du bassin (abdominaux, carrés des lombes, etc.) sont sollicités.



Graphique de transmission des forces au cours du cycle de pédalage

Remarque : les non spécialistes de l'activité exploitent surtout la 1^{ère} phase (phase de poussée) et laissent inconsciemment leur jambe arrière en appui sur la pédale qui remonte. Cela représente une perte d'énergie considérable compte tenu du poids d'un membre inférieur (une dizaine de kilos).

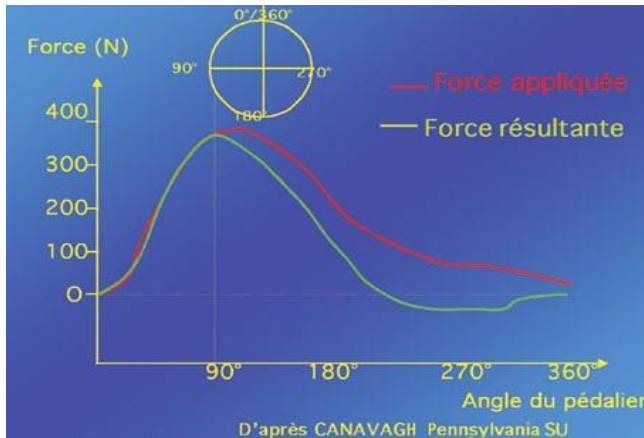
Remarque : l'exploitation de ces quatre phases est fortement dépendante du matériel employé, et notamment de pédales automatiques ou de cales pieds. Depuis la fin des années 80 on a constaté une accélération de l'évolution du matériel. Au chapitre des révolutions, on retrouve l'apparition des pédales automatiques qui ont permis de solidariser le pied à la pédale sans altérer la liberté du pied et de la cheville. Les avantages sont multiples :

- plus de sécurité (déchaussage rapide) ;
- plus de rendement (efforts de tractions sur la pédale facilités) ;
- plus de confort (plus besoin de serrage des sangles de cale-pieds).

Remarque : les positions assises et en danseuse génèrent des patterns de pédalage complètement différents avec des couples de force décalés en fonction de l'angle de la manivelle. De plus, le pédalage en montée semble générer des patterns différents comparés à ceux sur le plat.

Coordination et rendement : la coordination de ces quatre phases va conditionner l'efficacité du geste de pédalage, c'est à dire son rendement. Comme le geste est répété des milliers de fois, les gains, même lorsqu'ils sont minimes, peuvent faire la différence entre des sujets possédant des qualités bioénergétiques et mentales comparables. Un bon rendement permet une meilleure vitesse et une épargne musculaire qui peuvent être décisives dans les derniers kilomètres. Le geste de pédalage n'est donc pas un geste frustré, mais un geste complexe, qui peut faire l'objet d'une optimisation par l'apprentissage et l'entraînement.

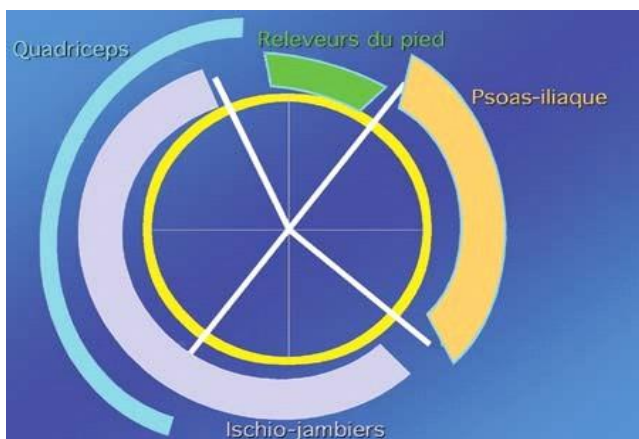
Remarques : lorsque le cycliste applique une force sur la pédale, seule la composante tangentielle à la trajectoire de la pédale est rentable. Les autres composantes sont perdues. Canavagh a étudié l'application des forces sur les pédales lors d'un cycle de pédalage et mis en évidence une différence entre la force appliquée par le cycliste et la composante utile de cette force. Le diagramme suivant montre cette différence :



On note que la phase de poussée est très rentable sur le plan mécanique. C'est au niveau des phases de transition et des phases de tirage que le "gaspillage" est le plus important. L'auteur a aussi mis en évidence la différence de rendement entre les différents cyclistes inclus dans son étude. Certains font de la phase de tirage une phase rentable, d'autres ne l'utilisent que très peu (figure ci-dessous). On peut penser que, pour les seconds, une meilleure utilisation de cette phase pourrait donner des gains de performance significatifs.



Le cycle de pédalage permet, pour chaque groupe musculaire, l'alternance de phases d'activité et de récupération. Plus le cycliste sera coordonné et relâché, plus il pourra bénéficier de ces phases de récupération.



Conséquences pédagogiques → exercices et méthodes pour améliorer l'efficacité technique du pédalage :

- séquences courtes de pédalage d'une seule jambe (alternées : une jambe après l'autre) ;
- pédalage à des cadences très élevées bassin fixé avec critère de réussite ne pas rebondir sur la selle (descente avec développement court en ayant toujours une action propulsive du pied sur la pédale) ;
- pédalage à des cadences très faibles (type force), assis sur la selle et bassin fixé (montées avec développement long, éventuellement mains derrière le dos) ;
- alternance de périodes de pédalage assis et en danseuse car les patterns de pédalage sont différents ;
- méthode des contrastes consistant à alterner très petit et très grand braquet ;
- à haut niveau, utilisation de capteurs de puissance embarqués (avec des jauges des contraintes) qui permettent d'apporter un feedback en temps réel (type SRM) ;

Pour tous ces exercices, la consigne est d'essayer de « pédaler rond » (concentration et écoute des sensations).