

**Le développement
du métabolisme
aérobie
chez l'athlète de haut
niveau**

Licence 3ème année Mention Entraînement

Cotteaux Julien
Chaillou Thomas

Le développement du métabolisme aérobie chez l'athlète de haut niveau

- Le métabolisme aérobie
- Évaluation de l'aptitude aérobie
- Développement de la filière
- Adaptations métaboliques à l'entraînement aérobie

A. Le métabolisme aérobie

- Les différents substrats utilisés lors de l'exercice aérobie
- La production d' ATP lors de l'exercice aérobie
- La notion de consommation max d'O₂

I. Les différents substrats utilisés lors de l'exercice aérobie

1.1 Les glucides

1.2 Les lipides

1.3 Les protéines

1.1 Les glucides

Apports alimentaires: Sucres



Conversion en Glucose



Transport par le sang vers toutes les Cellules



Le sucre capté par le foie et les muscles
transformation en glycogène




Glycogène stocké dans le cytoplasme
utilisation.

Glycogène du foie \longrightarrow transformé en glucose
transporté par le sang vers les différents tissus.

1.1 Les glucides

Les réserves en Glycogène hépatiques et musculaires sont:

 Limitées

 Vite épuisables sans une alimentation appropriée
à l'exercice

1.2 Les lipides

Apports alimentaires: Graisses



Stockées dans le corps sous forme de triglycérides



Transformation de leur forme complexe, triglycéride en glycérol et en acides gras libres

1.2 Les lipides

Seuls les acides gras libres permettent de former de l'ATP

Les lipides:

- ➔ stockés d'une manière importante dans le corps
- ➔ énergie +++, mais le débit énergétique -
- ➔ moins accessibles que les glucides

1.3 Les protéines

Apports alimentaires: Protéines



Transformation en glucose (gluconéogenèse)

Transformation en acide gras lors de privation alimentaire
(lipogenèse)

1.3 Les protéines

➔ 5 à 10 % de l'apport énergétique lors d'un exercice prolongé

➔ production d'énergie uniquement par les acides aminés

II. La production d'ATP lors de l'exercice aérobic

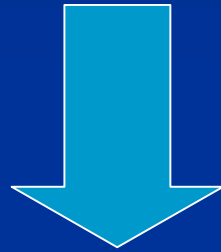
Deux systèmes

2.1 Le système glycolytique

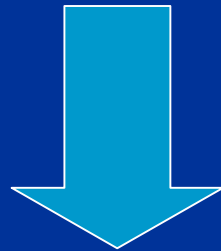
2.2 Le système oxydatif

2.1 Le système glycolytique

Glucose



Dégradation

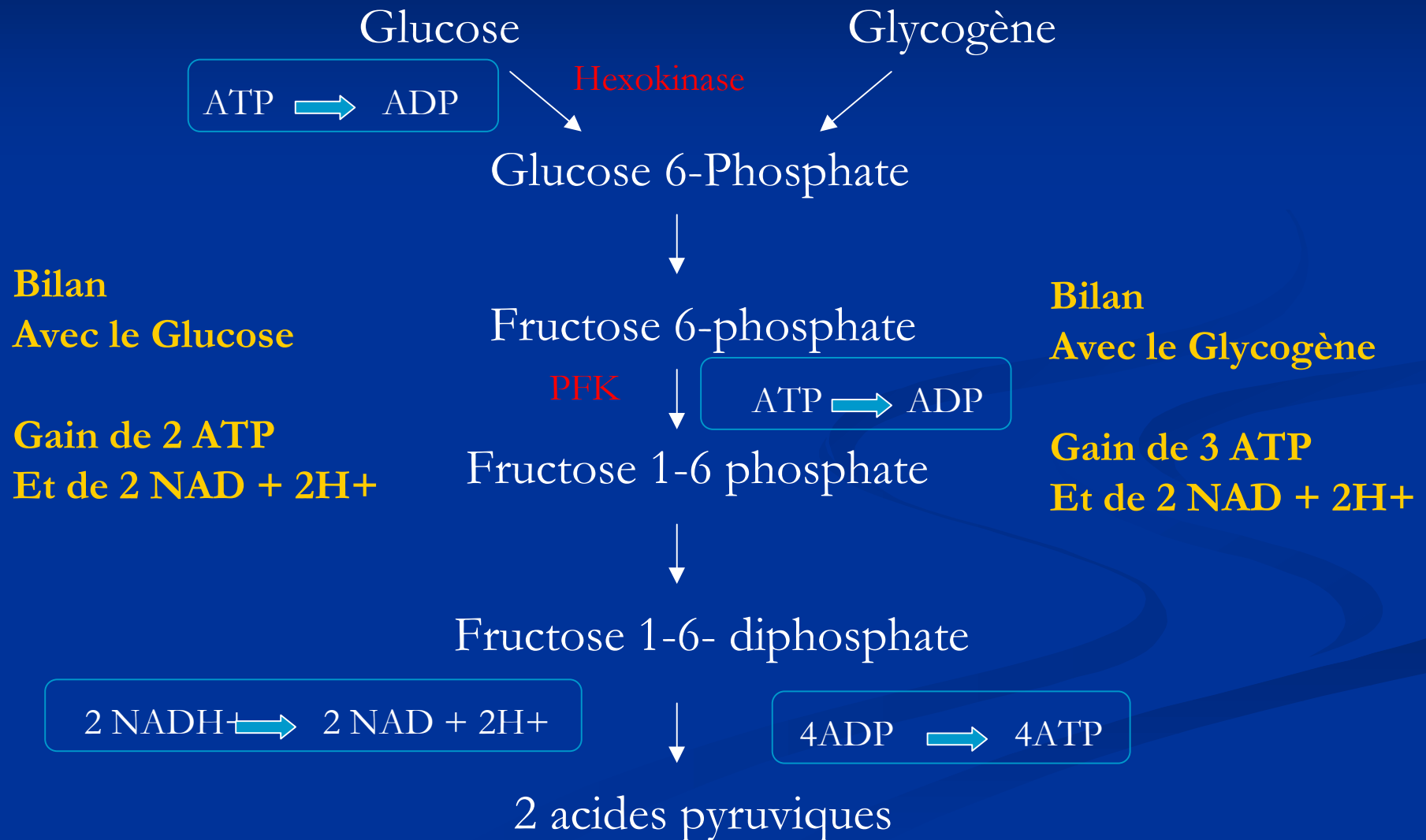


Énergie



ATP

2.1 Le système glycolytique



2.2 Le système oxydatif

Substrats + Oxygène



Dans les mitochondries

Dégradation



Respiration Cellulaire

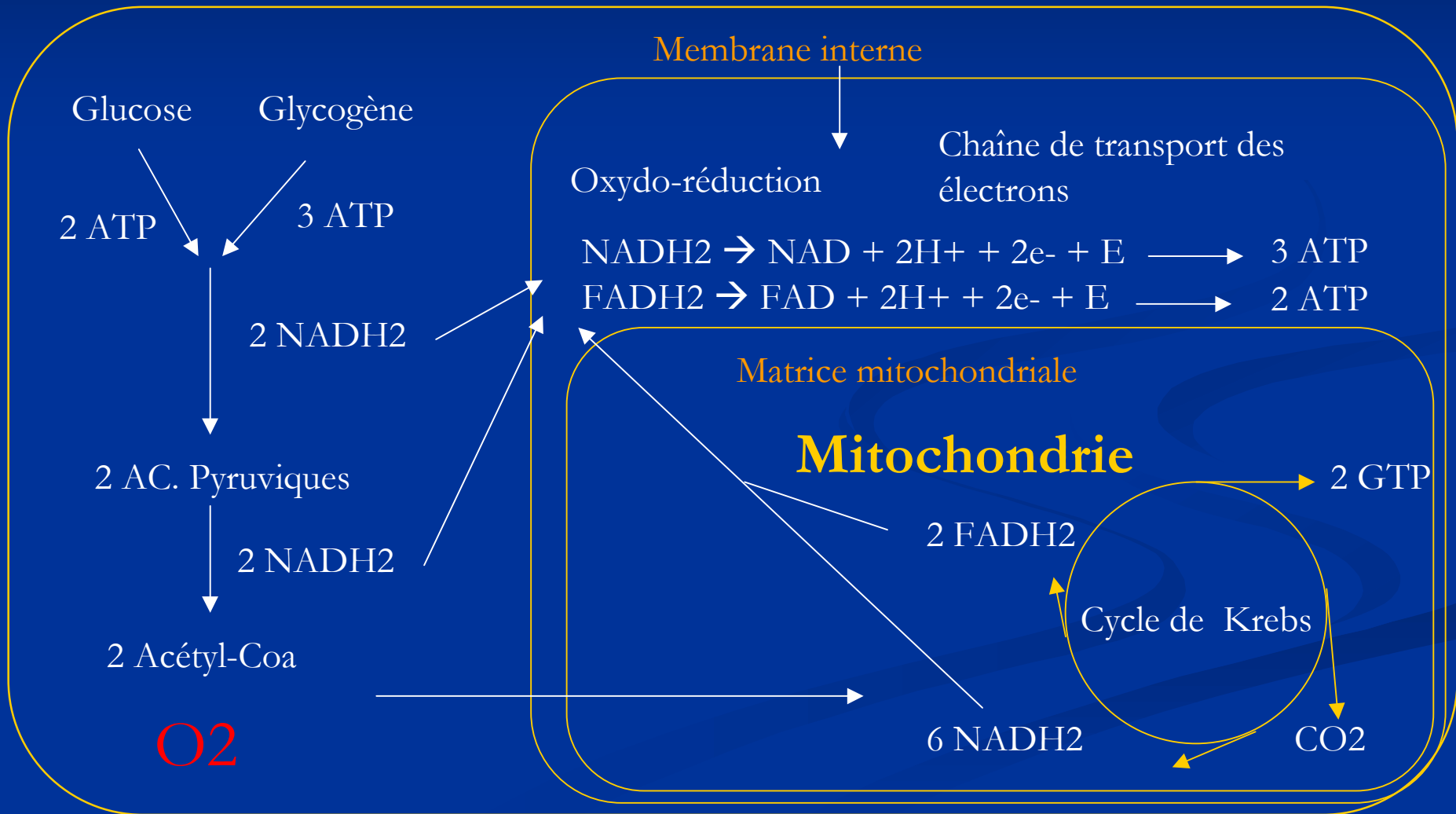
ATP



2.2 Le système oxydatif

L'oxydation des glucides

Cellule



2.2 Le système oxydatif

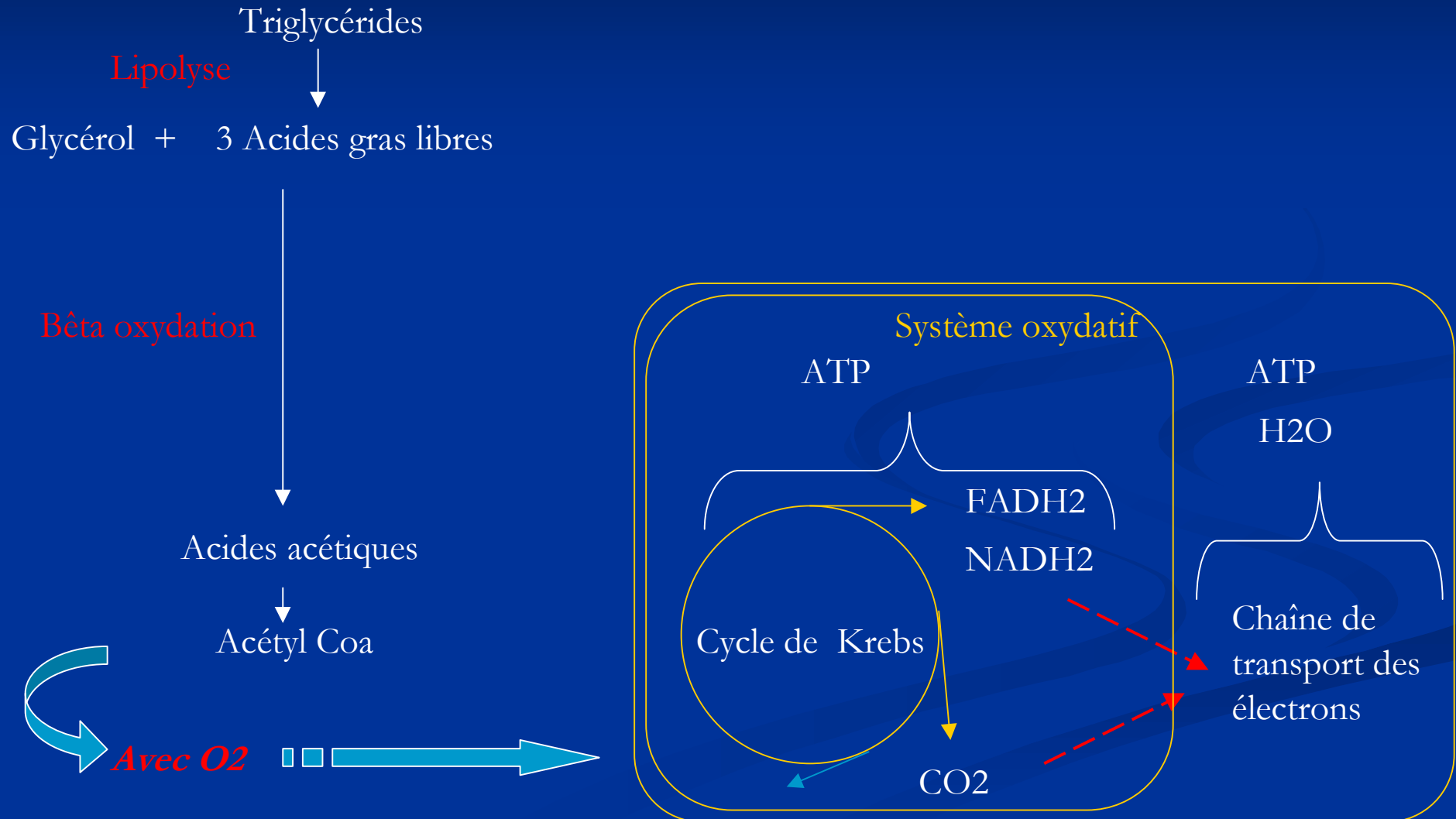
L'oxydation des glucides

Production de 38 ATP à partir du Glucose

Production de 39 ATP à partir du Glycogène

2.2 Le système oxydatif

L'oxydation des lipides



2.2 Le système oxydatif

L'oxydation des lipides

Principe de l'hélice de Lynen

$$\text{Nb de tour d'hélice} = \frac{\text{nb C}}{2} - 1$$

Pour 1 tour d'hélice formation de: 1 Acétyl Coa

1 NADH₂ → 3 ATP

1 FADH₂ → 2 ATP

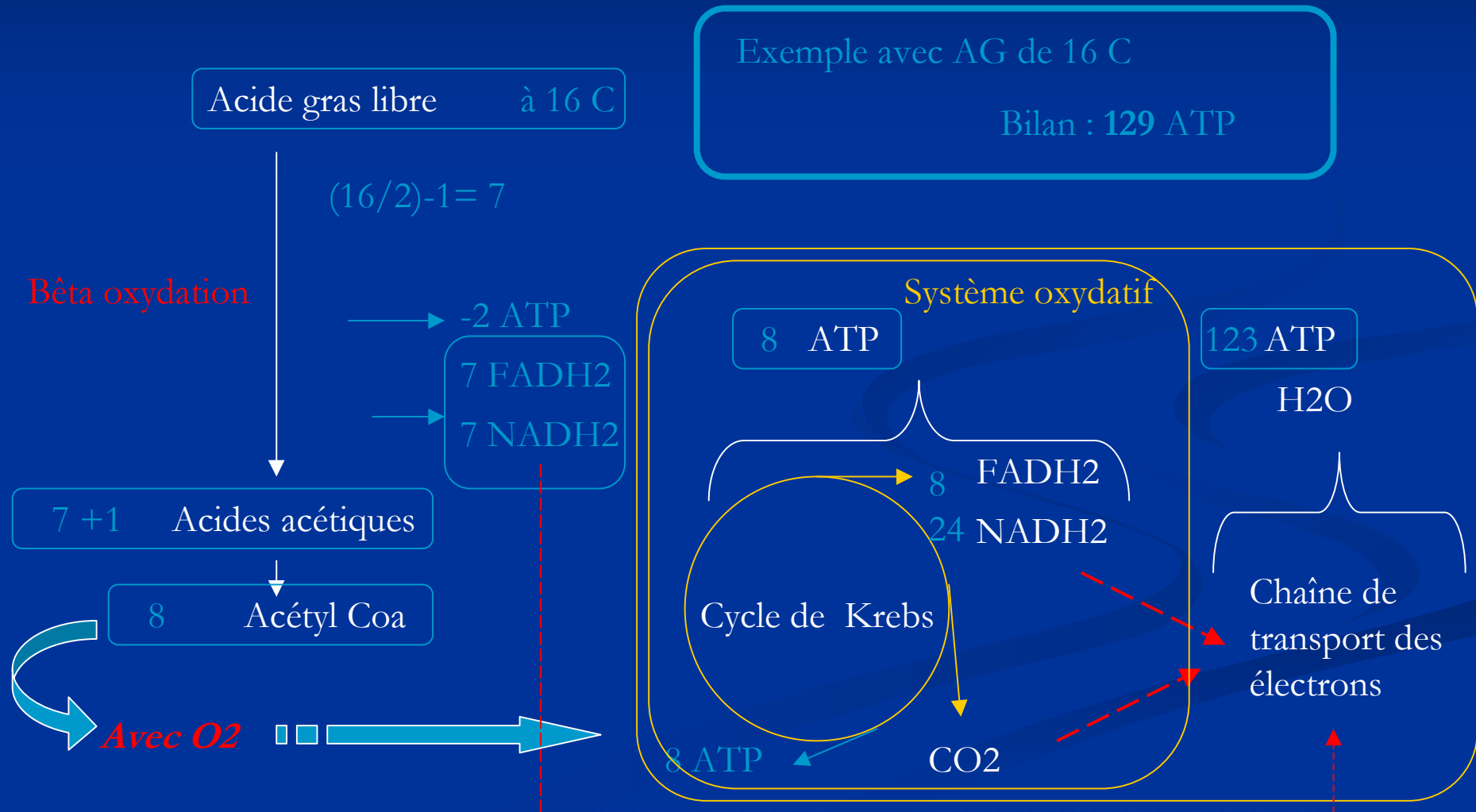
A la fin du dernier tour d'hélice
+ 1 acétyl Coa

Cycle de Krebs



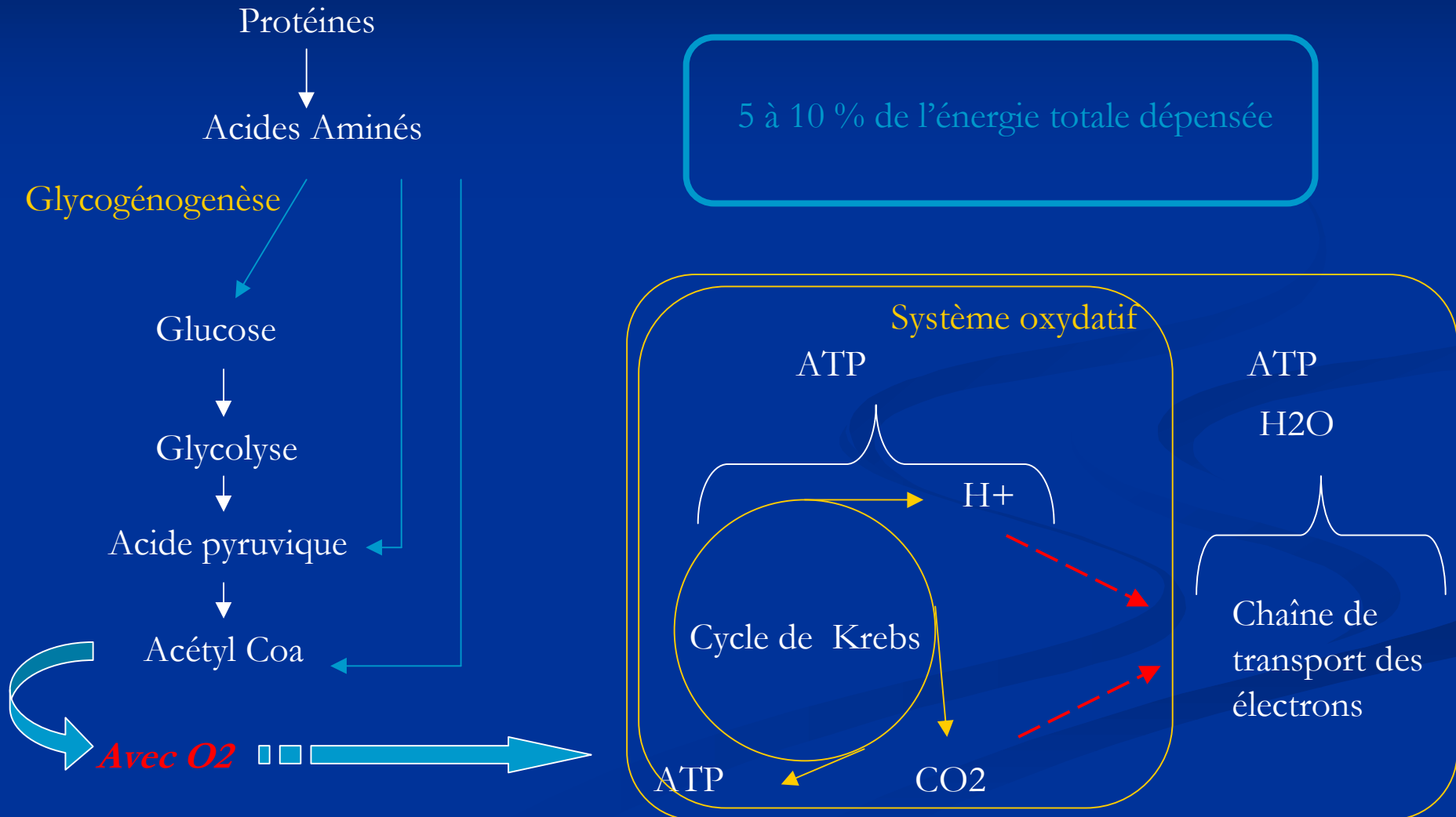
2.2 Le système oxydatif

L'oxydation des lipides



2.2 Le système oxydatif

L'oxydation des protéines



III. La notion de consommation max d'O₂

3.1 La notion de VO₂max

3.2 Les facteurs limitants

3.3 Les facteurs de variation

3.4 L'aptitude physique aérobie

3.5 Les seuils lactiques

3.1 La notion de $\dot{V}O_2\text{max}$

- ➔ Consommation maximale d'O₂ pendant un effort physique (en L/min ou en mL/kg/min)
- ➔ Augmentation de $\dot{V}O_2$ jusqu'à un plateau malgré l'élévation de la charge.
- ➔ valeurs comprises entre 20 et 90mL/kg/min

3.1 La notion de $\dot{V}O_2\text{max}$

➔ Indicateur de la performance aérobie

➔ Notion de PMA et VMA

➔ $\dot{V}O_2$ proportionnelle à la FC:

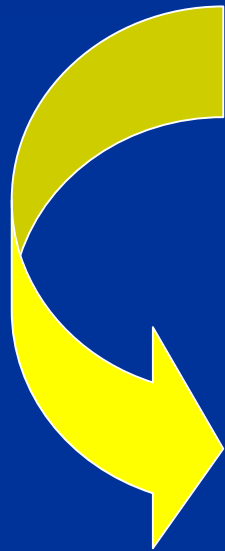


formule de Karvonen:

$$\%FC_{\text{max}} = (FC_{\text{ex}} - FC_{\text{repos}}) / (FC_{\text{max}} - FC_{\text{repos}})$$

3.2 Les facteurs limitants de la $\dot{V}O_2\text{max}$

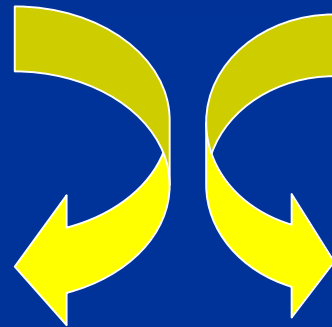
Le facteur cardiaque:



Débit cardiaque max
 $\dot{Q}_{\text{max}} = F_{\text{cmax}} * V_{\text{ESmax}}$

3.2 Les facteurs limitants de la $\dot{V}O_2\text{max}$

activité enzymatique du métabolisme aérobie:



enzymes oxydatives des mitochondries: incapacité à se servir de tout l' O_2 mis à disposition

$$\dot{V}O_2(\text{L}/\text{min}) = \text{VE}(\text{L}/\text{min}) * (\text{FIO}_2 - \text{FEO}_2)$$

acidose plasmatique et musculaire

Ventilation: pas facteur limitant (sauf pour l'élite sportive selon les auteurs)

3.3 Les facteurs de variations de la $\dot{V}O_{2\max}$



l'hérédité



la composition corporelle (% de masse grasse)



l'entraînement physique



l'âge



le sexe

3.4 Aptitude physique aérobie



La puissance aérobie:

Production d'un effort physique à VO_{2max} et à VMA.
Notion de puissance (intensité)

3.4 Aptitude physique aérobie



Capacité aérobie:

Maintien d'un effort physique à une puissance donnée (80% de la VO_{2max}).

Notion de durée

3.5 Les seuils lactiques

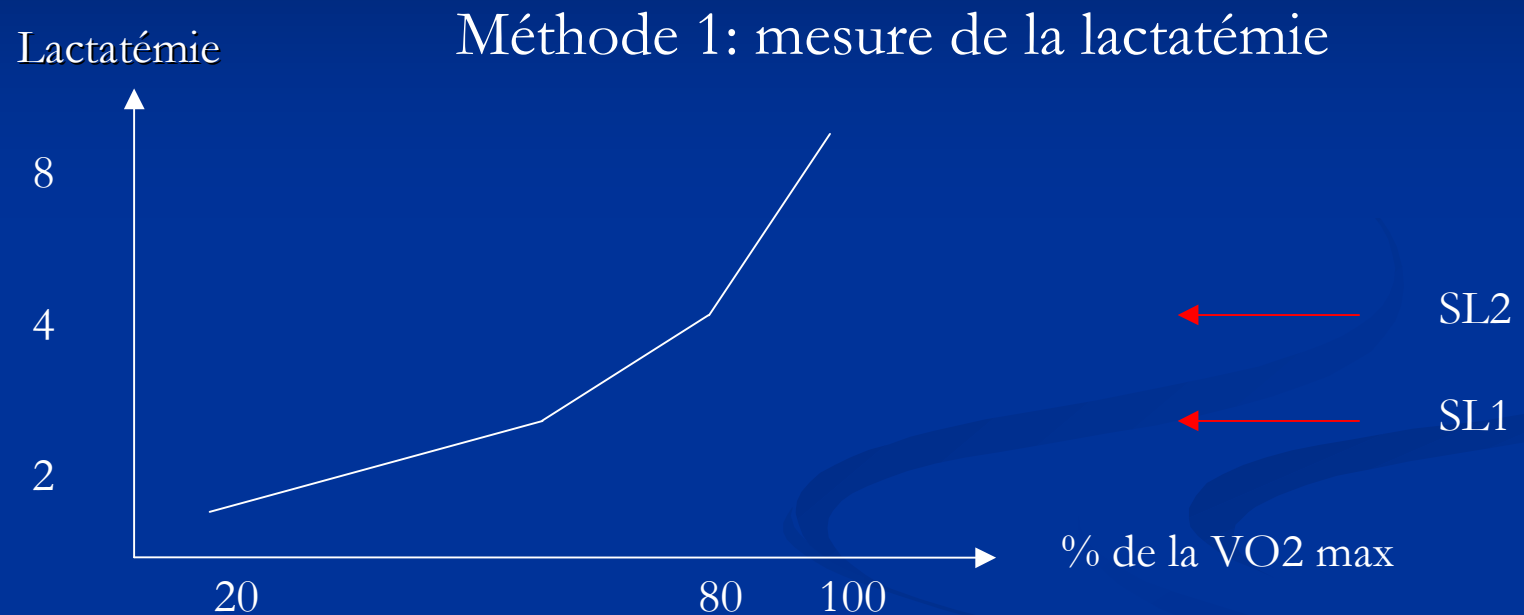
Mesure effectuée lors de test $\dot{V}O_2\text{max}$ en laboratoire ou avec des médecins spécialisés sur le terrain.

objectif: mise en évidence des intensités d'exercice pour développer le potentiel aérobie



3.5 Les seuils lactiques

Explication des résultats par 2 méthodes:



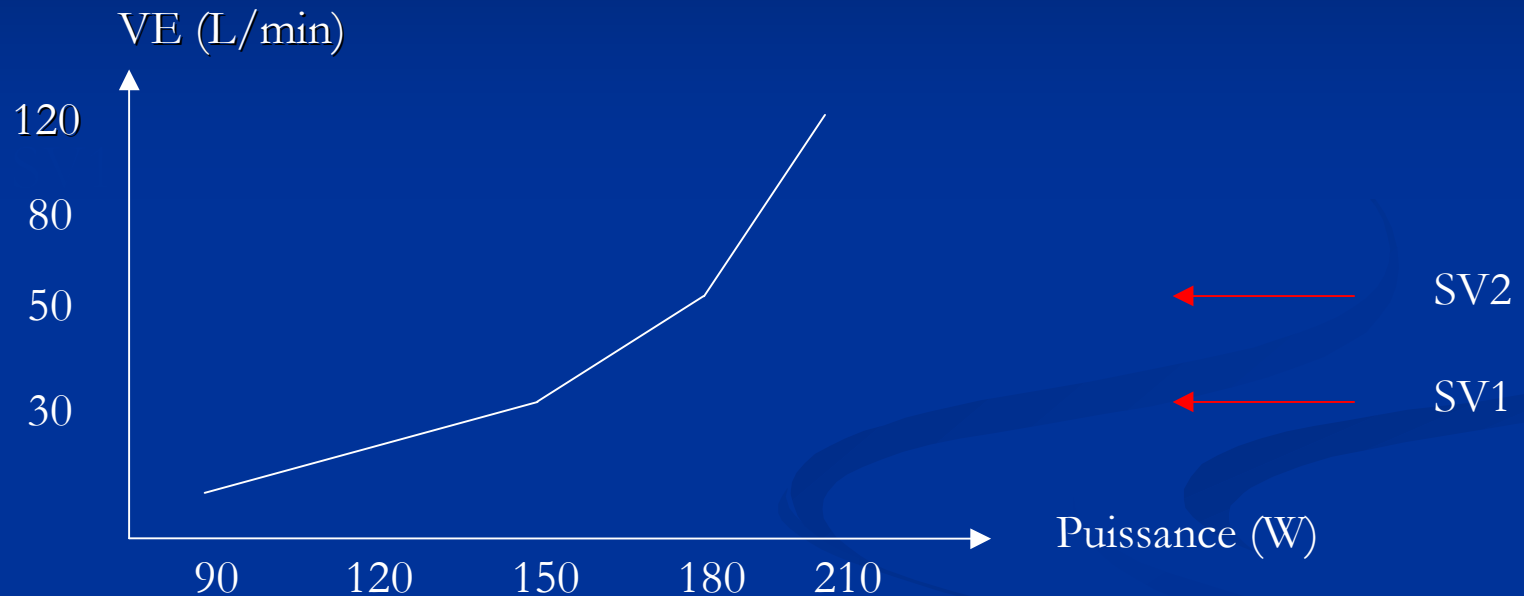
SL1 (seuil aérobie): apparition d'acide lactique (2mmol/L de sang), environ à 50-60% VO2max.

SL2 (seuil anaérobie): accumulation d'acide lactique (4mmol/L de sang), environ à 75-85% VO2max.

Estimations des seuils pas toujours exactes

3.5 Les seuils respiratoires

Méthode 2: évolution du volume expiratoire



SV1 (seuil aérobie): 1ère décrochement ventilatoire:

Augmentation du débit ventilatoire proportionnellement à la production de CO₂

SV2 (seuil anaérobie): 2ème décrochement ventilatoire:

Accumulation d'AL (et donc d'H⁺) → stimulation des centres nerveux → ventilation +++

B. Évaluation de l'aptitude aérobie

- Le test de laboratoire
- Les tests de terrain

- Le test de laboratoire (méthode directe)

Objectif:



Évaluation de l'aptitude aérobie par mesure de la $\dot{V}O_2\text{max}$



Suivi du sportif

I. Le test de laboratoire (méthode directe)

Matériel:

➔ ergomètre: ergocycle, machine à pagayer, tapis roulant

➔ chaîne de mesure des échanges gazeux: O₂ et CO₂

➔ ECG: détermination de la FC

I. Le test de laboratoire (méthode directe)

Caractéristiques:

➡ Ex à charge croissante ou triangulaire

➡ Palier progressif de 2 à 3min à intensité croissante

➡ Mesure éventuelle de la lactatémie

➡ Arrêt à l'épuisement du sportif

I. Le test de laboratoire (méthode directe)

Critères d'atteinte de la $\dot{V}O_{2max}$:

- $\dot{V}O_2$ plateau malgré l'élévation de charge
- Atteinte de la FC théorique ou plafonnement lors des 2 derniers plateaux. FC théorique = $220 - (\text{âge} \times 2)$
- Impossibilité de maintenir l'effort
- Lactatémie $>$ ou $=$ à 9 mmol/L .
- Quotient respiratoire $Q_r >$ ou $=$ à 1.1

I. Le test de laboratoire (méthode directe)



Avantages de cette méthode:

-Précision du test



Inconvénients de cette méthode:

-coût élevé

- réservée aux sportifs de haut niveau

- test maximal: volonté obligatoire

II. Le test de terrain (méthode indirecte)

2.1 Description

2.2 Les tests maximaux

2.2.1 Le test- piste (Léger et Boucher 1980):

2.2.2 Les autres tests

2.3 Les tests sous maximaux

2.3.1 Le test d'Astrand

2.3.2 Le step-test

2.1 Description



Intérêt:

Pas de mesure des échanges gazeux et donc de la VO_{2max} .



Postulat: coût métabolique identique chez tous les sportifs.



2 sortes de tests:

- les tests maximaux
- les tests sous-maximaux

2.2 Les tests maximaux

2.2.1 Le test- piste (Léger et Boucher 1980):



Principe du test

Mesure de la VMA

Augmentation progressive des vitesses de course par palier.

Course autour d'une piste de 400m et balisée tous les 25 ou 50m.

2.2 Les tests maximaux

2.2.1 Le test- piste (Léger et Boucher 1980):

Principe du test



Vitesse imposée par une bande magnétique sonore étalonnée

Vitesse initiale de 8km/h et augmentation d'1km/h à chaque palier

Incapacité à suivre le rythme: arrêt du test

2.2 Les tests maximaux

2.2.1 Le test- piste (Léger et Boucher 1980):

Résultats

Valeur retenue: vitesse réalisée au cours du dernier palier achevé= VMA



Avantages

Simplicité de mise en place

- Accessible à tous
- Résultats en corrélation avec les tests en laboratoire




Inconvénient

coût métabolique identique pour tous

2.2 Les tests maximaux

2.2.2 Les autres tests

Le test de course-navette (Léger et Lambert 1982):

- 
- course par palier de 1min
 - Aller retour entre 2 lignes espacées de 20m
 - Vitesse de départ=8.5km/h
 - Inconvénient : part de l'anaérobie ++

2.2 Les tests maximaux

2.2.2 Les autres tests



Le test de Cooper de 12min (1968):


-distance maximale réalisée en 12min
autour d'une piste d'athlétisme

- Inconvénient: pas de mesure de la
VMA

2.3 Les tests sous maximaux

2.3.1 Le test d'Astrand

Principe du test:

- 
- Test sous max à charge constante
 - Durée de quelques minutes
 - Travail à une intensité déterminée de 150W par exemple
 - Stabilisation de la FC à un plateau (entre 140 et 160 bpm) au bout de 6min par exemple
 - Estimation de la VO_{2max} avec le monogramme d'Astrand

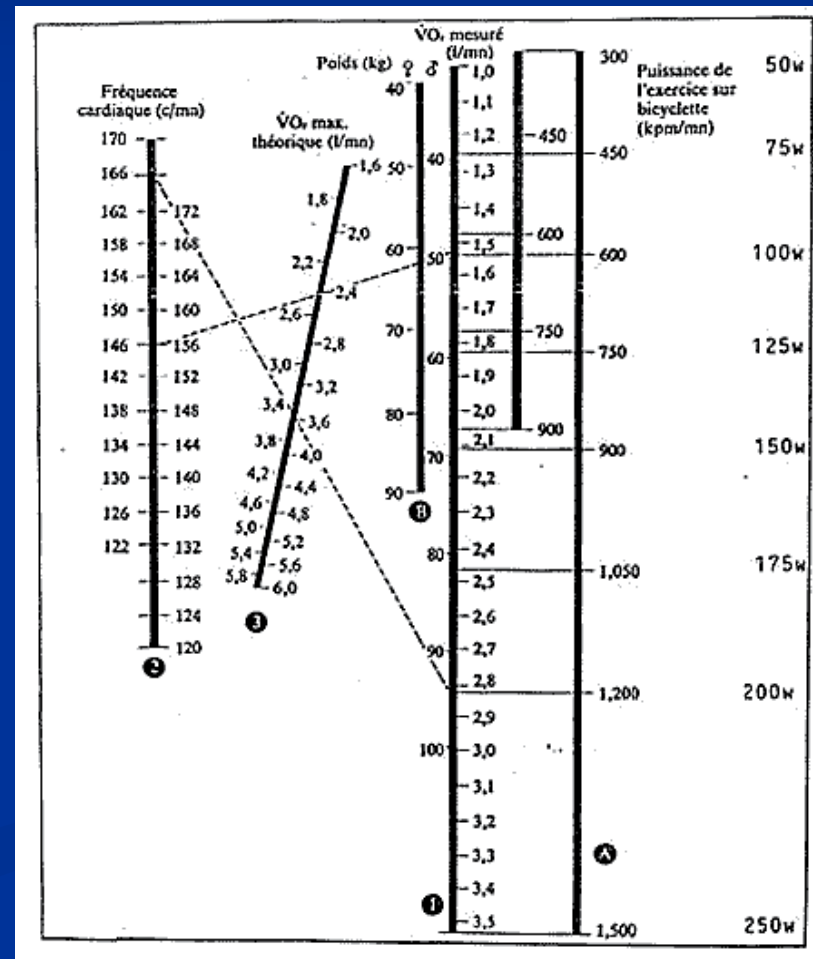
2.3 Les tests sous maximaux

2.3.1 Le test d'Astrand

Résultats:

Monogramme d'Astrand


Mesure fiable de la VO_{2max} sans un effort maximal et en particulier chez des sujets jeunes



2.3 Les tests sous maximaux

2.3.2 Le step-test


Principe du test:

- 
- Monter et descendre une marche à rythme constant
 - Rythme de 22.5fois/min pendant 5min
 - Hauteur de la marche prédéfini: 33cm pour les femmes et 40cm pour les hommes
 - Mesure de la FC à la fin de l'ex

2.3 Les tests sous maximaux

2.3.2 Le step-test

Résultats

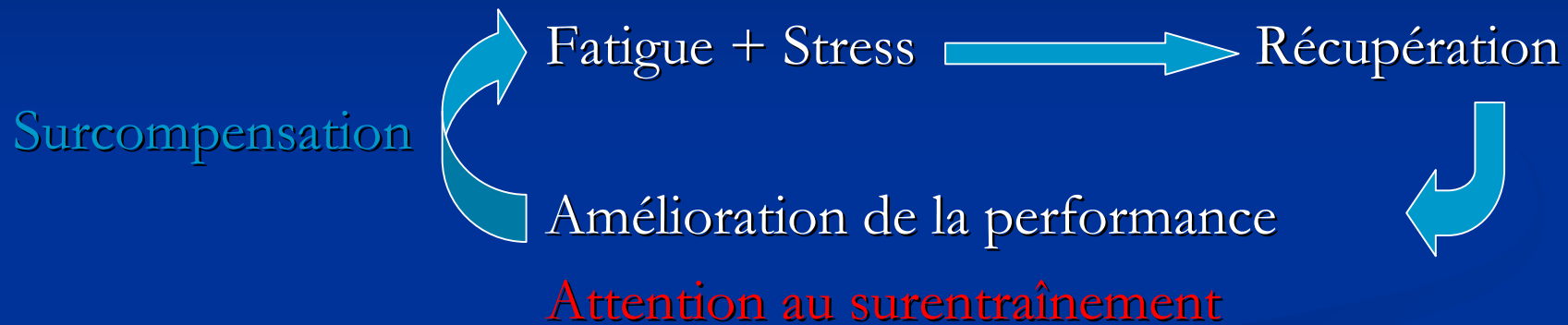
- 
- VO2max extrapolée par la relation $FC=f(VO_2)$.
 - Prise en compte de la FC théorique de repos et maximale
 - Test peu fiable

C. Développement de la filière

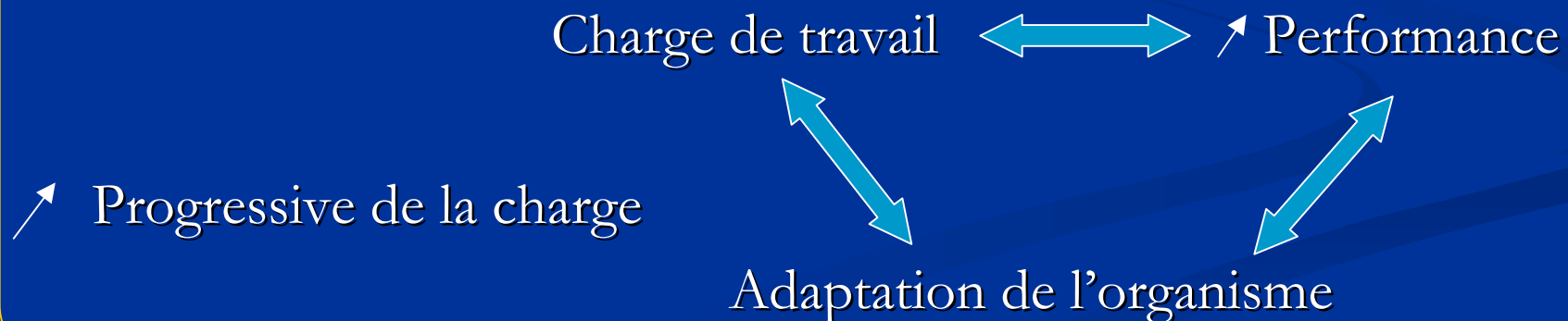
- Principes généraux de l'entraînement
- Principe du développement aérobie
- Planification

I Principes généraux de l'entraînement

Principe de surcharge



Principe de progressivité



I Principes généraux de l'entraînement

Principe de charge d'entraînement continue

Diminution de la performance proportionnelle à la courbe de progression



Importance d'un entraînement continu

Principe de périodicité de l'entraînement

Évolution de la charge d'entraînement au cours de la saison

↗ Intensité ↔ ↘ Volume

I Principes généraux de l'entraînement

Principe de la variation de la charge d'entraînement

Développement des qualités spécifiques de l'activité

Organisation judicieuse des différentes séances à dominante aérobie et anaérobie en tenant compte des phases de récupération

Principe de la succession judicieuse des charges d'entraînement

Force, Vitesse,
coordination

Endurance
de force

Endurance

sur une séance

I Principes généraux de l'entraînement

Principe de réversibilité

Avec arrêt de l'entraînement → inversement des adaptations de l'organisme

Principe de la spécificité de l'entraînement

Objectif de l'entraînement → Développer les qualités spécifiques à la pratique

II. Principe du développement aérobie

2.1 Actions développant principalement la puissance aérobie

2.2 Actions développant principalement la capacité aérobie

2.1 Actions développant principalement la puissance aérobie

Les efforts intermittents de longue durée



Succession d'efforts sous- maximaux (85 à 90% de la PMA) pendant trois minutes entrecoupés de récupération active équivalente (le tout fait 6 fois)

2.1 Actions développant principalement la puissance aérobie

Les efforts intermittents de durée moyenne



Succession d'efforts sous-maximaux ou maximaux (90 à 100% de la PMA) pdt 1 min entrecoupés de récupération active d'une durée de 2 min environ (le tout fait 8 à 10 fois)

2.1 Actions développant principalement la puissance aérobie

La méthode du « court-court »



Succession d'efforts maximaux ou supra-maximaux

(100 à 120% de la PMA) pdt 15 à 30 secondes entrecoupés de récupération active d'une durée équivalente

(le tout fait pendant 10 à 20 minutes)

2.1 Actions développant principalement la puissance aérobie

Utilité de l'intervalle training

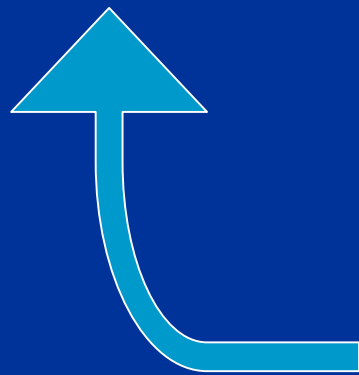
- Stimulation du système aérobie ayant provoqué une dette d'oxygène (production de lactate)



- Récup après effort supra max
Besoin d'oxygène importante



Nouvelle stimulation après récupération



Développement du système aérobie

2.2 Actions développant principalement la capacité aérobie

Les efforts continus d'intensité élevé



Effort continu sous maximal
(75 à 80% de la PMA) pendant 20 à 30
minutes

entre SL1 et SL2

2.2 Actions développant principalement la capacité aérobie

Les efforts continus d'intensité moyenne



Effort continu sous maximal

(70 à 75% de la PMA) pendant une durée de 45 minutes à plus d'une heure à SL1

2.2 Actions développant principalement la capacité aérobie

L'endurance fondamentale



Effort continu sous maximal
(50-60% de la PMA) pendant une durée très importante

NB: Elle peut se faire dans d'autres activités (Ski, course à pied, VTT, natation,...)

2.2 Actions développant principalement la capacité aérobie

Utilité de ce mécanisme



Habituer l'organisme à maintenir des efforts sous maximaux de longue durée



Améliorer ses qualités aérobies
pour supporter des charges
d'entraînement plus importantes

Impact psychologique

III. Planification

3.1 Caractéristiques de l'activité: le kayak de descente

3.2 L'athlète de haut niveau

3.3 Planification à l'année



3.1 Caractéristiques de l'activité: le kayak de descente

Deux types de courses: Course courte (2 min environ)

Course classique (10-15 min)

Aptitudes requises:

- Force musculaire
- Explosivité
- Endurance aérobie

3.2 L'athlète de haut niveau

Niveau de l'athlète: Équipe de France, niveau international

Nombre d'entraînements: 10 à 14 séances par semaine

Objectifs: - intermédiaire, participer aux Championnats du monde (piges: 4 mars 2006)

- principal, podium aux Championnats du Monde (15 juin)

Moyens: Salle de musculation, stade d'eaux vives, plan d'eau, tests terrains, tests laboratoires.

3.3 Planification
Étape 1: 4 mois développement conditions physiques
Volume bateau, développement Force
(musclature) ↗ Volume Intensité faible

Étape 2: 2 mois Technique eaux vives
développement spécifique Bateau Musclature
Volume élevé ↗ Intensité

Étape 3: 4 semaines Préparation spécifique
Compétition test (La Roche sur l'Yon)
↘ Volume ↗ Intensité

Étape 4: 1 semaine Objectifs
Sélections Championnats du Monde, Coupes du Monde

Étape 5: 2 semaines relâchement progressif volume faible
intensité faible

Étape 6: 2 semaines intensité faible volume faible

Période de préparation

Période de compétition

Période de transition

Macrocycle

3.3 Planification

Étape 1

21/09 au 9/10	10/10 au 16/10	17/10 au 30/10	31/10 au 6/11
Technique Bateau 2 sem	Régénération 1 sem	Volume bateau 2 sem	Régénération 1 sem

7/11 au 20/11	21/11 au 27/11	28/11 au 09/12	09/12 au 12/12
Volume bateau 2 sem	Régénération 1 sem	Dvpt Musculation Rappel Bateau 1,5 sem	Régénération 0,5 sem

13/12 au 22/12	23/12 au 2/01
Dvpt Musculation PPG 1,5 sem	Régénération 2 sem

Entraînement des athlètes de l'équipe de France -23 ans
Canoë Kayak (Septembre à Janvier)

3.3 Planification

21/09 au 9/10	10/10 au 16/10	17/10 au 30/10	31/10 au 6/11
Technique Bateau 2 sem	Régénération 1 sem	Volume bateau 2 sem	Régénération 1 sem

7/11 au 20/11	21/11 au 27/11	28/11 au 09/12	09/12 au 12/12
Volume bateau 2 sem	Régénération 1 sem	Dvp Musculation Rappel Bateau 1,5 sem	Régénération 0,5 sem

13/12 au 22/12	23/12 au 2/01
Dvp Musculation PPG 1,5 sem	Régénération 2 sem

Entraînement des athlètes de l'équipe de France -23 ans
Canoë Kayak (Septembre à Janvier)

3.3 Planification

Semaines Développement

- 2 I1
- 4 I2
- 1 I3
- 1 I7
- 2-3 FE
- 1 FP
- 1 footing
- 1 Natation
- 1 VTT

14-15 séances / sem

Semaine

17/10 au 30/10	31/10 au 6/11
Volume bateau 2 sem	Régénération 1 sem

1 méso cycle
2 microcycles

Entraînement des athlètes de l'équipe
de France -23 ans
Canoë Kayak (Septembre à Janvier)

3.3 Planification

Semaine régénération

- 3 I1
- 2 FE
- 1 footing
- 1 Natation
- 1 VTT

Semaine

8 séances / sem

17/10 au 30/10	31/10 au 6/11
Volume bateau 2 sem	Régénération 1 sem

1 méso cycle
2 microcycles

Entraînement des athlètes de l'équipe
de France -23 ans
Canoë Kayak (Septembre à Janvier)

D. Adaptations métaboliques à l'entraînement aérobie

- Augmentation de la PMA
- Adaptations musculaires
- Adaptations du système énergétique
- Adaptations cardiaques

I Augmentation de la PMA

Entraînement aérobie



Meilleure aptitude à réaliser un exercice sous maximal



Augmentation de la puissance max aérobie ($\dot{V}O_2$ max)

5-6 fois du vélo / sem pdt 8 sem \Rightarrow \nearrow 15% de la $\dot{V}O_2$
2h **chez un sédentaire**

II Adaptations musculaires

 Entraînement aérobie
Modification structurale et fonctionnelle

 Type de fibre F I

 Augmentation du nbr de capillaires

(Néo vascularisation)

 Meilleurs:


Perfusion musculaire

Échanges gazeux

Échanges de nutriments

Élimination des déchets

II Adaptations musculaires

 Entraînement aérobie
Modification structurale et fonctionnelle

 Augmentation de la teneur en myoglobine du muscle
(sert à fournir de l'O₂ avant le déclenchement du système)



Avec l'entraînement aérobie

augmentation de l'ordre de 80% du
contenu musculaire en myoglobine

II Adaptations musculaires



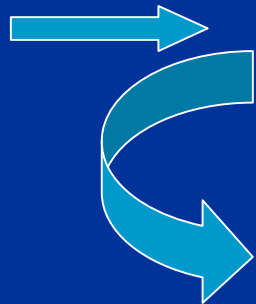
Entraînement aérobie

Modification structurale et fonctionnelle



Augmentation du nombre et de la taille des mitochondries

Augmentation de l'efficacité du métabolisme oxydatif



Augmentation de l'action enzymatique

Meilleur: - dégradations oxydatives de substrats métaboliques
- synthèse de l'ATP au niveau des chaînes respiratoires

III Adaptations du système énergétique



Entraînement aérobie

Modifications au niveau

3.1 Glucidique

3.2 Lipidique

III Adaptations du système énergétique

3.1 Niveau glucidique



Entraînement

Stimulation du processus de reconstitution des stocks en glycogène



Contenu en glycogène au repos beaucoup plus important

III Adaptations du système énergétique

3.2 Niveau lipidique



Entraînement

Stimulation du processus de reconstitution des stocks en triglycéride



Contenu en triglycéride au repos beaucoup plus important

Après 8 sem d'entraînements → réserve X 8

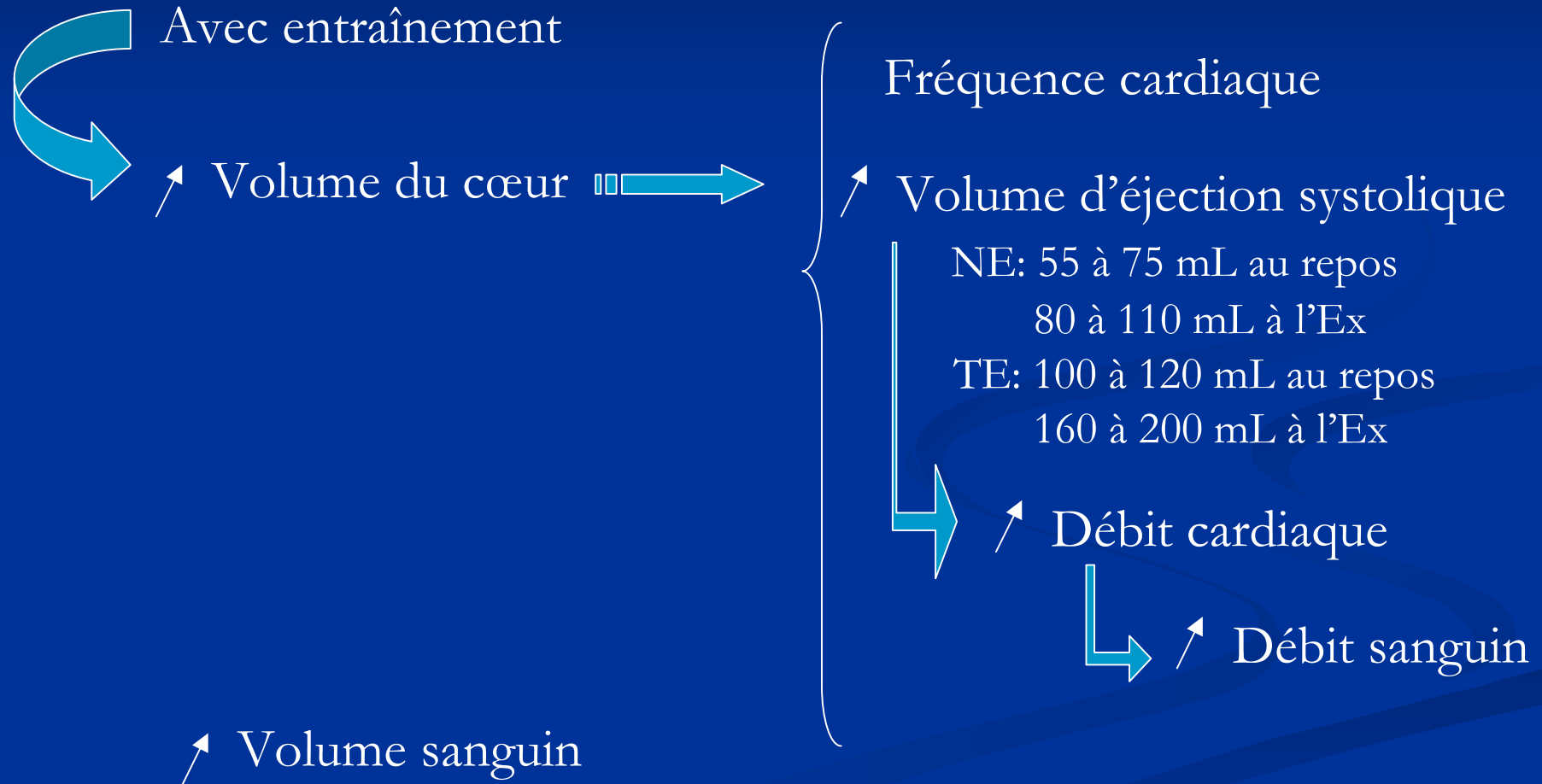
III Adaptations du système énergétique

Répartition de l'utilisation des substrats énergétiques en fonction l'intensité de l'exercice



→
Avec
entraînement

IV Adaptations cardiovasculaires



CONCLUSION

Le développement aérobie est fondamental à la performance dans les activités continues sous maximales chez le sportif peu entraîné ainsi que chez l'athlète de haut-niveau. Dans le chapitre sur le développement de la filière, nous avons trouvé pertinent de prendre un exemple de planification dans le cadre de notre activité sportive.

Cependant, l'amélioration de la performance dans une activité à dominante aérobie demande d'autres qualités sur le plan bio-énergétique...

Dans un autre exposé, il serait intéressant de traiter le développement du métabolisme anaérobie qui semble finalement être l'élément incontournable de la performance de haut-niveau.

Bibliographie

GERBEAUX Michel « Aptitude et pratique aérobie chez l'enfant et l'adolescent »

HASSANE Z. Cours de physiologie de l'exercice

MILLET G. et PEREY S. « Physiologie de l'exercice musculaire »

PRADET « Préparation physique »

WILMORE J. et COSTILL D. « Physiologie du sport et de l'exercice 2ème édition »

Fédération française de Canoë Kayak « programmation de l'entraînement de l'équipe de France de canoë kayak »

www.clubcardiosport.com

www.ultrafondus.com

www.inrs.fr

Fin