

RÉGULATION HORMONALE DE L'EXERCICE

Le système endocrinien

Plusieurs glandes endocrines, hypothalamus, hypophyse, thyroïde, parathyroïde, thymus, surrénales, pancréas, reins, tissu adipeux, ovaires, testicules.

Une glande est un organe ou groupement de cellules spécialisées dans la synthèse et la sécrétion de substances chimiques dotées de propriétés particulières. 3 types :

- Glandes **exocrines**
 - Canaux excréteurs : libère du produit de sécrétion hors de l'organisme (glande salivaire, sudoripares...)
- Glandes **endocrines**
 - Libère des hormones dans le sang qui irrigue la glande (neurohypophyse, surrénales...)
- Glandes **mixtes**
 - Amphicrines, les deux à la fois (pancréas, gonades)

Plusieurs modes de sécrétion :

- Sécrétions **autocrines** : l'hormone agit directement sur la glande endocrine (l'insuline sur le pancréas)
- Sécrétions **paracrines** : l'hormone agit dès sa sécrétion dans l'espace intercellulaire du même tissu (l'insuline inhibe la sécrétion du glucagon)
- Sécrétions **neurocrines** : l'hormone agit sur les cellules nerveuses environnantes (la gonadotrophine sur l'hypophyse)

CLASSIFICATION CHIMIQUE DES HORMONES

3 caractéristiques des hormones :

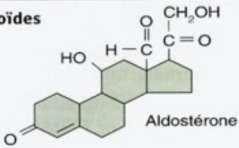
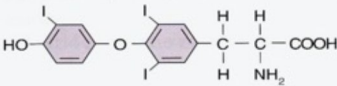
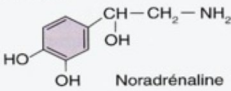
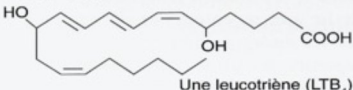
- Véhiculée en très faible concentration par le sang, dans tout l'organisme
- Agit à distance des cellules qui la sécrètent
- Reconnue par des cellules-organes cibles qui répondent de façon spécifique

Hormones **Liposolubles**

- Dérivée du **cholestérol**
- **Liposoluble** : diffuse facilement à travers les membranes cellulaires
- Sécrétées par
 - **Cortex surrénaliens** (cortisol, aldostérone)
 - **Ovaire et placenta** (œstrogènes et progestérone)
 - **Testicules** (testostérone)
- **Ou** dérivée d'acide aminé (**thyroxine et triiodothyronine**)

Hormones **hydrosolubles** se subdivisent en deux groupes : les **hormones dérivées des acides aminés** (catécholamines, mélatonine, sérotonine) et les **peptidiques ou protéiques** (ADH, ocytocine, EPO...)

La structure chimique de l'hormone détermine son mécanisme d'action ainsi que la cellule et l'organe cible

| EXEMPLES | ORIGINE | HORMONES |
|--|--|---|
| Hormones liposolubles | | |
| Stéroïdes  Aldostérone | Cortex surrénal. Reins. Testicules. Ovaires. | Aldostérone, cortisol et androgènes. Calcitriol. Testostérone. Œstrogènes et progestérone. |
| Hormones thyroïdiennes  Triiodothyronine (T ₃) | Glande thyroïde (cellules folliculaires). | T ₃ (triiodothyronine) et T ₄ (thyroxine). |
| Gaz (NO) N = 0 | Cellules endothéliales tapissant les vaisseaux sanguins. | Monoxyde d'azote (NO). |
| Hormones hydrosolubles | | |
| Amines  Noradrénaline | Médullosurrénale. Glande pinéale. Mastocytes du tissu conjonctif. Plaquettes sanguines. | Adrénaline et noradrénaline (catécholamines). Mélatonine. Histamine. Sérotinine. |
| Peptides et protéines Glutamine — Isoleucine Asparagine — Tyrosine Cystéine — S—S— Cystéine Proline Leucine Glycine — Ocytocine | Cellules neurosécrétrices de l'hypothalamus. Adénohypophyse. Pancréas. Glandes parathyroïdes. Glande thyroïde (cellules parafoolliculaires). Estomac et intestin grêle (cellules endocrines du tube digestif). Reins. Tissu adipeux. Toutes les cellules sauf les globules rouges. | Toutes les hormones de libération et d'inhibition de l'hypothalamus, ocytocine, hormone antidiurétique. Hormone de croissance, thyrotrophine, corticotrophine, hormone folliculostimulante, hormone lutéinisante, prolactine, hormone mélanotrope. Insuline, glucagon, somatostatine, polypeptide pancréatique. Parathormone. Calcitonine. Gastrine, sécrétine, cholécystokinine, peptide insulino-tropique gluco-dépendant. Érythropoïétine. Leptine. Prostaglandines, leucotriènes. |
| Eicosanoïdes  Une leucotriène (LTB ₄) | | |

SÉCRÉTIONS HORMONALES ET CONCENTRATION PLASMIQUE

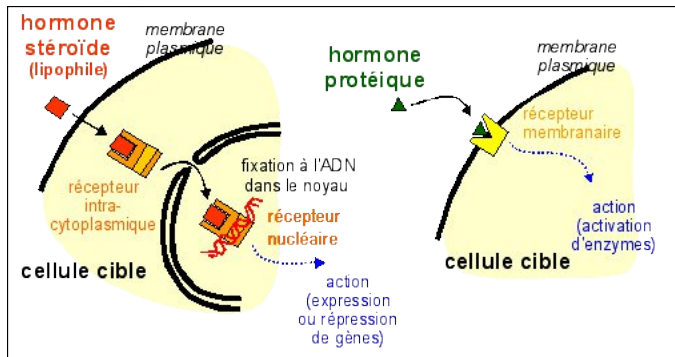
Les sécrétions sont libérées de manière pulsatile

Arrêt de sécrétion par *feedback négatif* (ex : insuline arrête d'être produite quand le taux sanguin devient normal)

Désensibilisation possible aux hormones comme les personnes résistantes à l'insuline : *down-regulation*.
Up-regulation existe mais plus rare.

LES EFFETS DES DIFFÉRENTES HORMONES

Récepteurs sur les cellules expliquent le fait que les hormones n'agissent pas partout mais soient *spécifiques*. Chaque cellule possède 2 000 à 10 000 récepteurs. Hydrosolubles sur la *membrane*, liposoluble dans le *cytoplasme ou le noyau*.



Les hormones liposolubles

Pénètre dans la cellule, se lie au récepteur, le complexe se fixe à l'ADN et *active la synthèse d'ARNm* : active la synthèse protéique de d'enzymes, de protéines de structures ou de protéines régulatrices.

Les hormones hydrosolubles

Se lie à un récepteur sur la membrane, et active *l'adénylate cyclase* qui stimule la formation *d'un second messenger intracellulaire* comme l'AMPc (ou GMPc, Ca^{2+}), active des protéines kinases qui aboutissent à des réponses qui peuvent inclure :

- L'activation d'enzymes cellulaires
- La modification de la perméabilité membranaire
- L'activation de la synthèse protéique
- Des modifications du métabolisme cellulaire
- La stimulation des sécrétions cellulaires

L'adrénaline, le glucagon et l'hormone lutéinisante agissent via AMPc.

Les prostaglandines

Souvent considérées comme des hormones, elles sont dérivées d'un acide gras, l'acide arachidonique.

Souvent locales, elles ont plusieurs fonctions et agissent dans l'environnement immédiat de leur lieu de production autocrine.

Les glandes endocrines et leurs hormones

PRINCIPALES GLANDES ET HORMONES

| Glandes endocrines | Hormone | Organe cible | Fonctions principales |
|----------------------------|----------------------------|---------------------|---|
| Hypophyse (lobe antérieur) | Hormone de croissance (GH) | Toutes les cellules | Stimule le développement de tous les tissus, augmente la synthèse protéique, active la mobilisation des graisses et leur utilisation comme source énergétique, diminue le taux d'utilisation des glucides |
| | Hormone thyroïdienne (TSH) | Glande thyroïde | Contrôle la sécrétion de thyroxine et de triiodothyronine produite et libérées par la glande thyroïde |

| | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|
| | Hormone adrénocorticotrope (ACTH) | Cortex surrénalien | Contrôle la sécrétion des hormones corticosurréaliennes |
| | Prolactine | Glande mammaire | Stimule le développement de la glande mammaire et la sécrétion lactée |
| | Hormone folliculostimulante (FSH) | Ovaires, testicules | Déclenche la maturation des follicules ovariens et stimule la sécrétion des œstrogènes par les ovaires et la spermatogenèse par les testicules |
| | Hormone lutéinisante (LH) | Ovaires, testicules | Stimule la sécrétion d'œstrogènes et de progestérone, déclenche l'ovulation, active la sécrétion de testostérone |
| Lobe postérieur (et hypothalamus) | Hormone antidiurétique (ADH) | Reins | Participe au contrôle de l'excrétion de l'eau par les reins, augmente la pression artérielle en favorisant la vasoconstriction |
| | Ocytocine | Utérus, glande mammaire | Stimule la contraction des muscles utérins et la sécrétion lactée |
| Thyroïde | Thyroxine et triiodothyronine | Toutes les cellules | Augmente l'activité métabolique des cellules, augmente la fréquence et la contractilité du cœur |
| | Calcitonine | Os | Contrôle la concentration des ions calcium dans le sang |
| Parathyroïdes | Parathormone (PTH) | Os, intestins, reins | Contrôle la concentration des ions calcium dans les liquides extracellulaires par action indirecte au niveau des os, des intestins et des reins |
| Surrénales médulla | Adrénaline | Une grande partie des cellules | Mobilise le glycogène, augmente le débit sanguin musculaire, augmente la fréquence et la contractilité du cœur, augmente la consommation d'oxygène |
| | Noradrénaline | Une grande partie des cellules | Entraîne la contraction des artérioles et des veinules, élève la pression artérielle |
| Cortex surrénalien | Minéralocorticoïdes | Reins | Augmente la rétention de sodium et l'excrétion du potassium au niveau des reins |
| | Glucocorticoïdes (cortisol) | Une grande partie des cellules | Contrôle le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines ; action anti-inflammatoire |
| | Androgènes et œstrogènes | Ovaires, glandes mammaires et testicules | Développement des caractères sexuels masculins et féminins |
| Pancréas | Insuline | Toutes les cellules | Contrôle la glycémie en diminuant le niveau de glucose sanguin ; augmente l'utilisation du glucose et la synthèse des graisses |
| | Glucagon | Toutes les cellules | Augmente la glycémie ; accélère la dégradation des graisses et des protéines |
| | Somatostatine | Ilots de Langerhans et tractus gastro-intestinal | Inhibe la sécrétion de l'insuline et du glucagon |
| Reins | Rénine | Corticosurrénales | Participe au contrôle de la pression artérielle |
| | Erythropoïétine (EPO) | Moelle épinière | Stimule la synthèse des globules rouges |
| Gonades, testicules | Testostérone | Organes sexuels, muscles | Active le développement des caractères sexuels masculins, stimule la croissance musculaire |
| Ovaires | Œstrogènes | Organes sexuels, tissu adipeux | Développement des organes sexuels féminins, augmente le stockage des graisses et participe à la régulation du cycle menstruel |

RÉGULATION DES SÉCRÉTIONS HORMONALES

3 types de stimuli :

- **Hormonal**

- H. Hypothalamus : H. adénohypophysaires : cortisol, H thyroïdiennes, H sexuelles

- **Humoral**

- Calcium sanguin : H parathyroïdienne ou calcitonine
- Glucose : insuline ou glucagon
- O₂ : EPO

- **Nerveux**

- Influx nerveux : catécholamines

Rétroactions : augmentation de la concentration plasmatique de l'hormone inhibe sa libération

- En diminuant les niveaux plasmatiques de l'hormone adénohypophysaire et de l'H. de libération hypothalamique à l'origine de sa sécrétion
- En diminuant les niveaux plasmatiques du substrat à l'origine de sa sécrétion

ADAPTATIONS HORMONALES À L'EXERCICE

1. *Réaction d'alarme*

- *De courte durée*
- Ensemble de réactions déclenchées par l'hypothalamus, stimule le système nerveux sympathique et la médullosurrénale qui sécrète les *catécholamines* (hormones à action rapide et brève)
- Entraîne un afflux de glucose et d'O₂ vers les organes les plus impliqués dans la gestion du « danger » (cerveau, coeur, muscles squelettiques)

2. *Étape de résistance*

- *Dure plus longtemps que l'étape précédente*
- Déclenchée principalement par les hormones *hypothalamiques* (CRH, GHRH, TRH) qui agissent sur des glandes endocrines ou non-endocrines: sécrétion et libération d'ACTH, hGH, TSH qui entraîne la sécrétion d'autres hormones (*cortisol, aldostérone, T3 et T4*)
- Induit des modifications au niveau du *métabolisme énergétique et hydroélectrolytique*

3. *Étape d'épuisement*

- Une exposition *prolongée* à des concentrations élevées de cortisol ou d'autres hormones pendant l'étape de résistance peut entraîner des effets délétères au niveau immunitaire, musculaire, pancréatique, etc.

Régulation hormonale du métabolisme énergétique à l'exercice

LES GLANDES ENDOCRINES IMPLIQUÉES DANS LA RÉGULATION MÉTABOLIQUE

L'hypophyse

Régule beaucoup de glandes via ses hormones, et est régulée par l'*hypothalamus*. Le lobe antérieur sécrète six hormones en réponse à la sécrétion par l'hypothalamus d'hormones spécifiques qui sont soit des *releasing-factors* soit des *inhibiting-factors*.

L'exercice augmente le taux de libération de toutes les hormones antéhypophysaires. A l'exception de l'hormone de croissance (GH) et de la prolactine, les 4 autres contrôlent l'activité de glandes endocrines. Le niveau de GH s'élève lors d'exercice aérobie de manière proportionnelle à son intensité.

La glande thyroïde

Sécrète *triiodothyronine* (T₃) et *thyroxine* (T₄) qui augmentent le métabolisme de base de 60% à 100%. Et également la *calcitonine* qui contrôle le métabolisme calcique.

L'exercice augmente la sécrétion de TSH donc augmentation de T₃ et T₄.

Les glandes surrénales

Au pôle supérieur de chaque rein, il faut distinguer au centre la *médulla surrénalienne* et à la périphérie le *cortex surrénalien*

La médulla sécrète l'adrénaline et la noradrénaline. Ces deux hormones préparent aux situations *d'urgence ou de stress*. La noradrénaline plasmatique augmente dès 50% de VO₂max ; l'adrénaline vers 60/70%. A l'arrêt l'adrénaline descend en quelques minutes, la noradrénaline en qq heures. Effet sur le débit sanguin par l'intermédiaire des fibres alpha et bêta adrénérgiques.

Le cortex surrénalien sécrète plus de trente hormones stéroïdes : les corticostéroïdes divisés en 3 groupes

- *Minéralocorticoïde*
- *Glucocorticoïdes*, aident à maintenir la glycémie constante. Le *cortisol* est responsable à lui seul de 95% de l'activité glucocorticoïde, il est connu pour :
 - Stimuler la gluconéogenèse, augmenter la mobilisation des AGL, diminuer l'utilisation de glucose, stimuler le catabolisme protéique, exercer un effet anti-inflammatoire...
- *Gonadocorticoïde*

Le pancréas

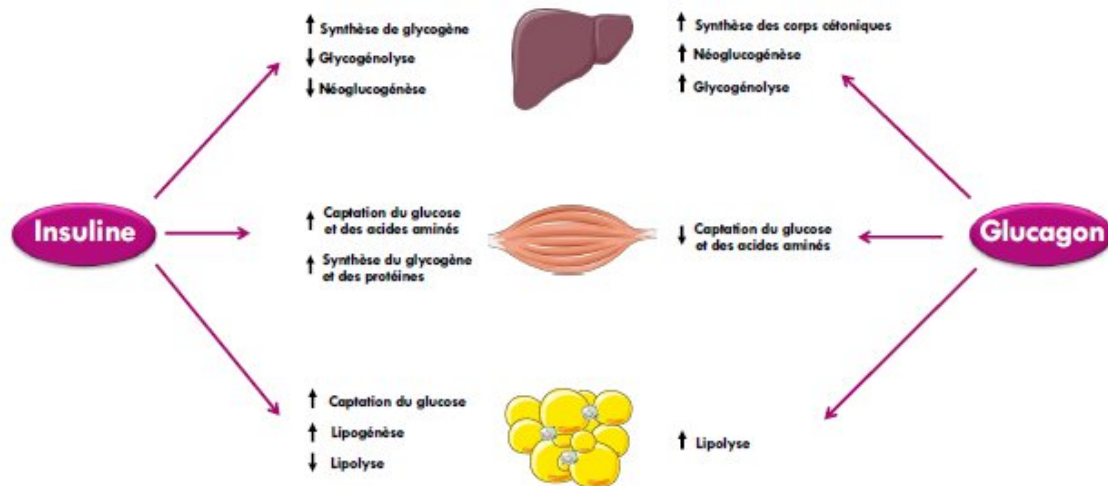
Sécrète principalement le *glucagon* et l'*insuline*.

L'*insuline* diminue le taux de glucose dans le sang, elle stimule la glycogénogenèse et inhibe la néoglucogenèse. Elle stimule également la synthèse des protéines et des lipides.

Le *glucagon* a les *effets inverse*. Il stimule la glycogénolyse ainsi que la néoglucogenèse.

Lors d'un exercice *l'insulinémie baisse*, mais la *glycémie se maintient*. Le *glucagon lui monte* pendant toute la durée de l'exercice, stimulant la glycogénolyse hépatique. Ces réponses hormonales sont atténuées chez les sujets entraînés.

Effets physiologiques de l'insuline et du glucagon



RÉGULATION DU MÉTABOLISME DU GLUCOSE À L'EXERCICE

La concentration plasmatique du glucose

Déterminée par la consommation musculaire et par son débit de production hépatique. *4 hormones* permettent d'augmenter la quantité de glucose plasmatique :

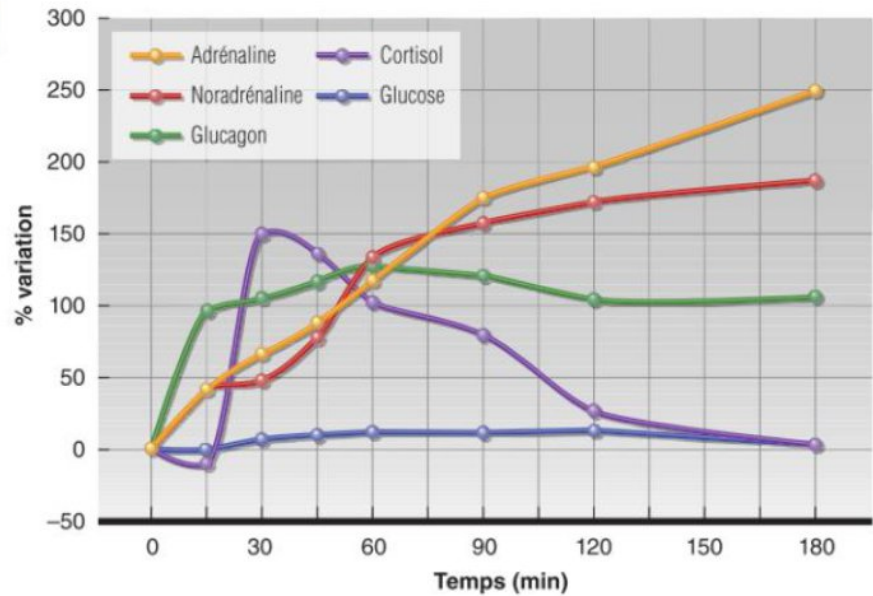
- *L'adrénaline*
- *La noradrénaline*
- *Le glucagon*
- *Le cortisol*, au bout de 30/45 minutes, activant le catabolisme protéique

La glycémie peut monter lors d'exercice pas trop longs car le muscle utilise d'abord ses stocks de glycogène, et le glucose libéré par le foie peut rester dans le sang.

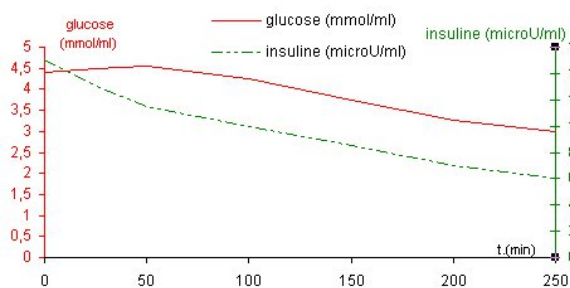
Figure 4.4



Variations (en % des valeurs préexercice) des concentrations plasmatiques d'adrénaline, de noradrénaline, de glucagon, de cortisol, et de glucose lors d'un exercice sur bicyclette de 3 h à 65 % $\dot{V}O_2$ max. Remarquez que la glycémie reste constante pendant les 120 premières minutes d'exercice, puis commence à baisser en dépit de l'augmentation des hormones qui stimulent la production hépatique de glucose.



Le prélèvement du glucose par les muscles



L'insuline *facilite l'entrée du glucose* dans la fibre musculaire.

Schéma rappelle que l'activité d'une hormone dépend de sa concentration mais aussi de la *sensibilité cellulaire*. En effet, l'exercice améliore la liaison de l'insuline aux récepteurs des fibres.

Interaction système nerveux central – système endocrinien

Le système nerveux central est très sensible au glucose et détecte alors les hormones notamment l'insuline.

RÉGULATION DU MÉTABOLISME DES LIPIDES À L'EXERCICE

Lorsque les réserves glucidiques sont faibles, l'organisme utilise l'oxydation des lipides. Ceci est facilité par le *glucagon, cortisol, l'hormone de croissance, l'adrénaline et la noradrénaline*. L'insuline a un effet inverse. Le cortisol a un pic au bout de 30 à 45min puis revient à son niveau basal.

La lipolyse augmente avec la durée et l'intensité de l'exercice.

Régulation hormonale de l'équilibre hydroélectrolytique à l'exercice

Dès le début de l'exercice, l'eau diffuse du milieu sanguin vers les espaces interstitiels et intracellulaires. On a également une augmentation des déchets métaboliques et donc de la pression osmotique créant un appel d'eau. + la sudation

LES GLANDES ENDOCRINES IMPLIQUÉES DANS LA RÉGULATION DE L'ÉQUILIBRE HYDROÉLECTROLYTIQUE À L'EXERCICE

Le lobe postérieur de l'hypophyse

Excroissance du tissu nerveux de l'hypothalamus, on l'appelle aussi **neurohypophyse**.

2 hormones synthétisées dans l'hypothalamus, stockées dans des vésicules nerveuses terminales de la neurohypophyse.

- **Ocytocine**
- **ADH (antidiurétique) : rétention d'eau au niveau des reins**

L'ADH permet la conservation de l'eau en augmentant la perméabilité du tube collecteur du rein : diminution des pertes d'eau par les urines. Les pertes d'eau induites par l'exercice entraînent une augmentation des concentration électrolytiques dans le plasma : c'est **l'hémoconcentration** qui entraîne une **osmolarité** plasmatique.

Unité : osmole

Correspond au **nombre de particules dans les compartiments liquidiens** (intracellulaire, plasmatique et interstitiel)

La concentration en osmole par litre exprime **l'osmolarité**

Concentration en temps normal au repos : **300 mOsm.L-1**

Concentration différente engendre mouvements d'eau

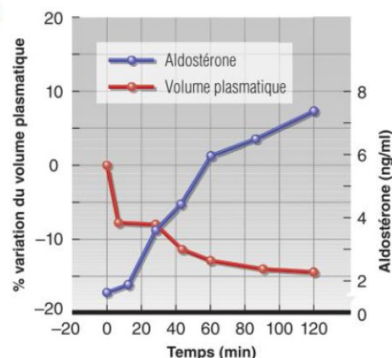
- **L'augmentation de l'osmolarité plasmatique**, détectée par les osmorécepteurs de l'hypothalamus, représente le stimulus physiologique primaire de la sécrétion d'ADH.
- **Baisse du volume plasmatique** détectée par les barorécepteurs du système cardiovasculaire représente un autre stimulus.

Le cortex surrénalien

Aldostérone, et les minéralocorticoïdes en général, régulent la balance hydroélectrolytique.

Figure 4.8

Variations du volume plasmatique et de la concentration en aldostérone lors d'un exercice de pédalage de 2 h. Le volume plasmatique diminue rapidement pendant les premières minutes d'exercice. La diminution se poursuit beaucoup plus lentement ensuite, malgré d'importantes pertes sudorales. La concentration plasmatique d'aldostérone augmente tout au long de l'exercice.

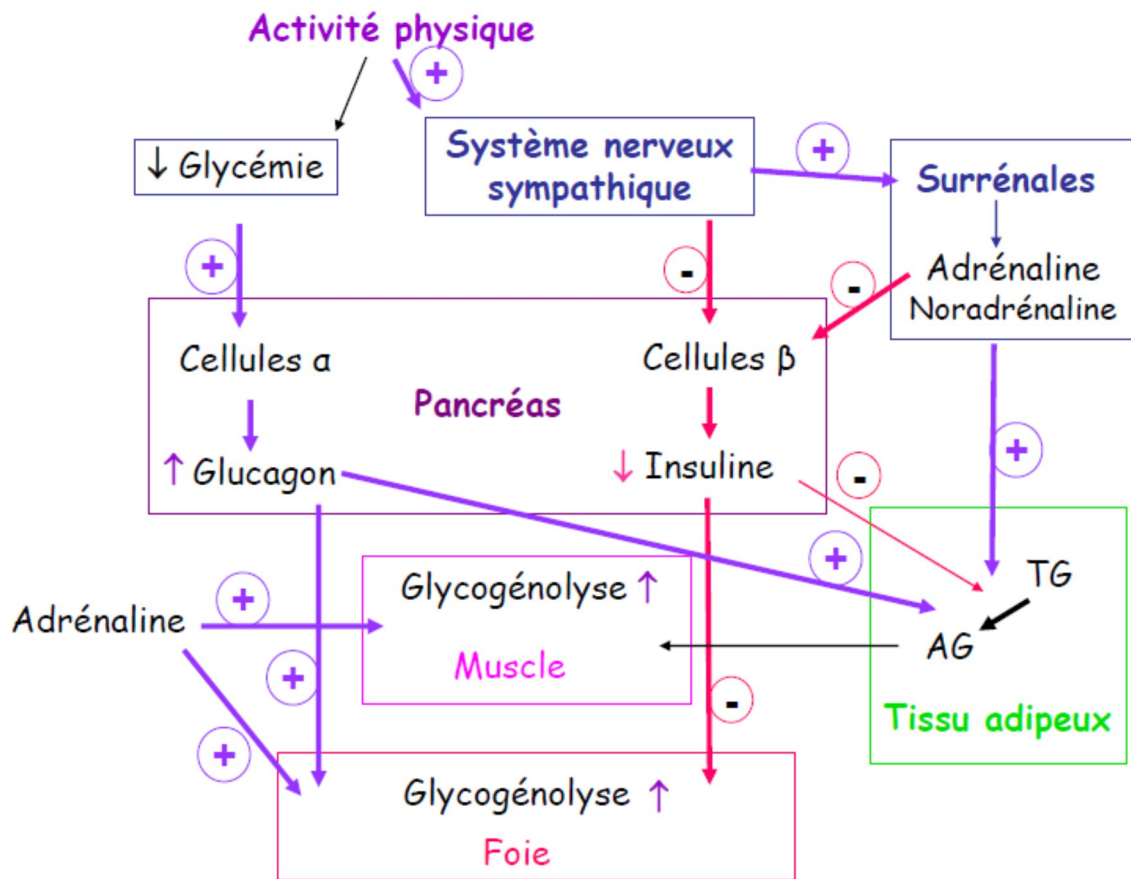


- Aldostérone agit essentiellement **en facilitant la réabsorption du sodium**. Donc d'eau, donc excrétion de K⁺
- Stimulée par la diminution du sodium plasmatique, diminution du volume sanguin, diminution de la pression artérielle et augmentation de la concentration plasmatique en potassium.

LES REINS COMME ORGANES ENDOCRINIENS

Deux hormones :

- **Rénine**, en réponse à une diminution de la pression artérielle, permet de convertir de l'angiotensinogène en angiotensine II qui entraîne une vasoconstriction et stimule l'aldostérone
- **Erythropoïétine** (EPO), régule la production des globules rouges du sang (érythrocytes)



Régulation hormonale de l'apport calorique

3 phases :

- **Ingestive** (faim)
- **Prandiale** (miam)
- **Post-prandiale** (satiété)

Deux types d'hormones : **anorexigène**, et **orexigène**

LES HORMONES DU TRACTUS GASTRO-INTESTINAL

Anorexigènes :

- **Cholécystokinine** (CCK), quand dilatation gastro-intestinal liée au remplissage de l'estomac, supprime la faim.
- **Également GLP-1 et peptide YY (PYY)** par l'intestin grêle et le gros intestin
- **Insuline** aussi par le pancréas

Orexigène :

- **Ghréline**, sécrétée par le pancréas et l'estomac

LE TISSU ADIPEUX COMME GLANDE ENDOCRINE

Leptine agit pour diminuer la faim. Proportionnelle à la masse grasse, mais possible résistance à la leptine chez les personnes obèses.

EFFETS DE L'EXERCICE ET DE L'ENTRAÎNEMENT SUR LES HORMONES DE SATIÉTÉ

En réaction à l'exercice aérobie, diminution de la sécrétion de ghréline.

Après l'activité, augmentation de la sensation de faim (PYY)

ADAPTATIONS HORMONALES À L'ENTRAÎNEMENT

Effet de l'entraînement sur les hormones pancréatiques

Il faut dissocier les adaptations des sécrétions hormonales de celles des récepteurs.

LES CONCENTRATIONS PLASMATIQUES D'INSULINE ET DE GLUCAGON CHEZ LE SUJET ENTRAÎNÉ

Concentration d'insuline inférieure chez le sujet entraîné. Grâce à sensibilité à l'insuline supérieure. La tolérance au glucose est également améliorée. Il y a corrélation entre VO₂max et la sensibilité à l'insuline.

L'augmentation du nombre de transporteurs GLUT-4 joue un rôle essentiel dans le processus d'adaptation de sensibilité à l'insuline. Il est également possible qu'une adaptation enzymatique (hexokinase, citrate synthétase) complète l'augmentation du nombre de transporteurs.

De plus, l'entraînement aérobie favorise la transformation des fibres de type IIa en I, plus vascularisées. La densité capillaire est améliorée et la sensibilité à l'insuline alors plus importante.

Il y aurait aussi une adaptation au sein même des cellules Beta du pancréas.

Adaptation à l'insuline est rapide (environ une semaine) mais Désentraînement tout aussi rapide.

FACTS

Les concentrations plasmatiques de la noradrénaline sont le meilleur témoin de l'activité neuronale du SNS.

L'exercice aigu se caractérise par une élévation modérée des androgènes.