MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE « Abbas LAGHROUR » DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
Département de biologie moléculaire et cellulaire

N° de série : …

Mémoire de fin d'étude

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Génétique

Thème

Effets génétiques et épigénétiques des hormones anabolisantes et autres substances injectables en musculation

Réalisé par :

- Benamrane Fadi
- Bakhouche Mohamed Karim

Présenté le 03/06/2026

Membres de jury :

Présidente	Pr. Bendjemana Katia.	Université de Khenchela
Encadrant	Dr. Sebihi Fatima Zohra.	Université de Khenchela
Examinatrice	Dr. Djemil Randa.	Université de Khenchela

Année 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre encadrant, Dr Sebihi Fatima Zohra, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance à Pr Bendjemana Katia et Dr Djemil Randa, membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux enseignants de la Faculté des Sciences de la nature et de la vie de Université Abbas Laghrour khenchela pour la qualité de la formation qu'ils nous ont offerte durant notre parcours universitaire.

Nos profonds remerciements vont à nos chers parents pour leurs sacrifices, leurs encouragements permanents et leur soutien moral tout au long de nos études.

Enfin, nous remercions toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de cette thèse.

Dédicace

Je dédie ce mémoire avant tout à ma très chère mère, la personne qui a été présente à mes côtés depuis le premier jour où j'ai ouvert les yeux sur ce monde. Elle a été pour moi une mère, un père, une amie et un véritable soutien dans chaque étape de ma vie. Sans ses sacrifices, sa patience, son amour et ses encouragements, je n'aurais jamais pu atteindre ce stade de mon parcours. Je lui adresse mes plus sincères remerciements, mon profond respect et toute ma gratitude.

À mon frère, Rami Benamrane, pour son soutien constant et son aide dans les grandes comme dans les petites décisions de ma vie. Merci d'avoir toujours cru en moi et d'avoir été présent dans les moments importants.

À mes amis, que je considère comme des frères:

Bakhouche Mohammed Karime, l'ami ambitieux, dynamique et toujours plein de bonne humeur

Benmansour Mohamed Anes, comme un petit frère toujours présent quand j'ai besoin de lui

Nous avons commencé ce parcours universitaire ensemble depuis la première année jusqu'à ce jour de réussite et de fin d'études. Je vous souhaite à tous beaucoup de bonheur, de succès et de réussite dans vos vies futures.

« Le succès n'est pas la clé du bonheur. Le bonheur est la clé du succès. » Albert Schweitzer

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

À ma chère mère,

Qui a été ma source de force, de patience et d'amour inconditionnel. Ce succès est le fruit de tes sacrifices, de tes prières et de ton soutien sans limite.

À mon cher père,

Pour tout ce qu'il m'a offert durant toutes mes années d'études, pour ses conseils, son encouragement et sa présence constante.

À mon ami et frère Anes,

Qui a été un véritable soutien, un compagnon fidèle dans les moments difficiles comme dans les moments de joie.

À mon ami et partenaire Fadi,

Pour son aide précieuse, sa loyauté et sa présence tout au long de la réalisation de ce travail.

À ma sœur aînée, la plus chère à mon cœur,

Merci pour ton amour, ton soutien et ta présence qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours.

À ma petite sœur chérie et gâtée,

Je te promets de rester toujours ton frère protecteur et ton soutien dans tout ce qui est bien pour toi.

Table des matières

Liste des figures ..... **V**

Liste des abréviations ..... **VII**

Introduction générale **1**

Chapitre 1: Caractéristiques chimiques et historiques des hormones anabolisantes et substances injectables

1-1 Hormones stéroïdes anabolisantes **5**

1-1-1- Définition et structure chimique **5**

1-1-2 Fonctionnement et mécanismes d'action **5**

1-1-3 Exemples d'hormones stéroïdes anabolisantes **6**

1-2 Hormones peptidiques et non stéroïdes **7**

1-2-1 Types de substances peptidiques **7**

1-2-2 Mécanismes d'action spécifiques **7**

1-2-3 Exemples d'hormones et substances non stéroïdes (Melvin H. Williams. Ergogenic Aids in Sport. Human Kinetics, 2005.) **8**

1-3 Autres substances anabolisantes injectables **9**

1-3-1 Beta-2 agonistes **9**

1-3-2 Inhibiteurs de la myostatine: **9**

1-3-3 Autres agents modifiant la croissance musculaire **9**

1-4 Caractéristiques chimiques des hormones anabolisantes **10**

1-4-1 Structure chimique des stéroïdes anabolisants **10**

1-4-1-1 Cycle stéroïdien et modifications chimiques 10

1-4-1-2 Dérivés de la testostérone et leurs propriétés 11

1-4-2 Les mécanismes d'action biochimique **11**

1-4-2-1 Interaction avec les récepteurs androgènes 11

1-4-2-2 Effet sur la synthèse des protéines musculaires 12

1-4-3 Substances peptidiques et leurs structures **13**

1-4-3-1 Mécanismes d'action des hormones de croissance 13

1-4-3-2 Effets des peptides sur la croissance cellulaire et la réparation musculaire 14

1-4-4 Autres caractéristiques chimiques des substances injectables **14**

1-4-4-1 Propriétés pharmacologiques des agents non stéroïdes 14
1-4-4-2 Impact sur la croissance musculaire et la performance 15
1-5 Historique des hormones anabolisantes 15
1-5-1 Découverte et premiers usages médicaux des hormones anabolisantes 15
1-5-1-1 Premières recherches sur la testostérone 15
1-5-1-2 Les premières utilisations thérapeutiques dans les années 1950 16
1-5-2 L'ère de l'expansion des stéroïdes dans les années 1960 et 1970 16
1-5-2-1 Utilisation dans le sport de haut niveau 16
1-5-2-2 L'introduction des stéroïdes dans les compétitions sportives 17
1-5-3 L'impact de la découverte de la synthèse chimique des dérivés anabolisants 17
1-5-3-1 Développement des premiers stéroïdes anabolisants synthétiques 17
1-5-3-2 Amélioration des propriétés pharmacologiques et réduction des effets secondaires .. 18
1-5-4 L'essor et les abus dans les années 1980 et 1990 18
1-5-4-1 Utilisation massive dans les sports de force et le bodybuilding 18
1-5-4-2 L'introduction des tests antidopage et leur impact 18
1-5-5 Législation et régulation des hormones anabolisantes 19
1-5-5-1 Législation mondiale sur les stéroïdes anabolisants 19
1-5-5-2 Le rôle des agences de régulation (ex: FDA, WADA) 19
1-5-5-3 Approches de lutte contre le dopage et les substances interdites 19
1-6 Applications thérapeutiques des hormones anabolisantes 19
1-6-1 Traitement des maladies liées à la perte musculaire 20
1-6-1-1 Utilisation en médecine pour les patients souffrant de cachexie ou d'atrophie musculaire 20
1-6-1-2 Substituts hormonaux dans le traitement de l'hypogonadisme masculin 20
1-6-2 Applications en médecine sportive 20
1-6-2-1 Récupération après blessures et chirurgie 20
1-6-2-2 Utilisation dans la performance des athlètes (avant l'ère des tests antidopage) 21
1-6-3 Éthique et controverses autour de l'usage des substances anabolisantes en médecine ... 21
1-7 Abus d'hormones anabolisantes dans le sport et ses conséquences 21
1-7-1 L'impact sur la performance sportive 22

1-7-2 Les risques pour la santé des utilisateurs 22

1-7-3 L'impact de l'abus de stéroïdes sur la réputation des sports 22

1-8 la fabrication des stéroïdes anabolisants sur le marché noir: 23

1-8-1 Production illicite des stéroïdes anabolisants et conséquences sur la santé: 23

1-8-2 Le marché noir des stéroïdes anabolisants: 24

1-8-2-1 Existence et portée 24

1-8-2-2 Produits contrefaits et de mauvaise qualité 24

1-8-3 Processus de fabrication 24

Chapitre 2: Effets génétiques des hormones anabolisantes

2-1 Interaction avec l'ADN: 27

2-1-1-Passage de l'hormone à travers la membrane cellulaire: 27

2-1-2- Structure du récepteur androgénique (AR) 28

2-1-3-Translocation nucléaire et liaison à l'ADN 29

2-1-4-Activation des gènes cibles: la synthèse des protéines contractiles: 30

2-1-4-1-La synthèse des protéines contractiles (actine, myosine): 30

2-1-4-2-La prolifération des cellules satellites: 31

2-1-4-3-La régulation du métabolisme musculaire: 32

2-1-4-4-La diminution de la dégradation protéique: 32

2-2- Modifications de l'expression des gènes: 34

2-2-1-Gènes liés à l'hypertrophie musculaire: 35

2-2-2- Gènes liés à la croissance cellulaire: 36

2-3- Risques génétiques: 38

2-3-1- Mutations: 38

2-3-2- Instabilité génomique: 39

2-3-3- Risque de cancer: 39

Chapitre 3: Les stéroïdes anabolisants légaux et les produits du marché noir

3-1- Différences entre stéroïdes anabolisants légaux et produits du marché noir 41

3-1-1- Stéroïdes pharmaceutiques légaux: 42

3-1-2- Stéroïdes du marché noir: **42**
3-1-2-1-Composition inconnue ou variable: 42
3-1-2-2-Contaminations et impuretés: 42
3-1-2-3-Effets secondaires plus intenses et imprévisibles: 43
3-1-2-4-Absence de suivi medical: 43
3-1-3 Conséquences à long terme: **43**
3-2- L'effet négative des stéroïdes anabolisantes illégale: **44**
3-2-1- Effets sur les muscles et le système musculo-squelettique: **44**
3-2-2- Effets dermatologiques et physiques: **45**
3-2-3 -Effets génétiques et cellulaires **47**
Conclusion générale **50**
Références Bibliographiques **52**
Résumé……

Liste des figures

Figure N°	Titre	Page
Figure 1	Mécanismes d'action des stéroïdes anabolisants en healthcare	6
Figure 2	Hormone de croissance	7
Figure 3	Mécanismes d'action de l'Hormone de croissance	8
Figure 4	Beta-2 agonistes	9
Figure 5	Structures des principaux stéroïdes naturels	10
Figure 6	Représentation schématique du récepteur des androgènes, avec ses différents domaines	12
Figure 7	Mécanisme d'action des stéroïdes anabolisants sur la synthèse des protéines musculaires	13
Figure 8	Mécanismes d'action des hormones de croissance	14
Figure 9	Le dopage par les stéroïdes anabolisants	17
Figure 10	Les stéroïdes anabolisants du marché noir (TRENBOLONE)	25
Figure 11	Mécanisme d'action génomique des androgènes via le récepteur aux androgènes	29
Figure 12	Mécanisme d'action des hormones stéroïdes: régulation de la transcription et synthèse des protéines	30
Figure 13	Mécanisme de la synthèse des protéines contractiles (actine et myosine) induite par les stéroïdes anabolisants dans le muscle squelettique	31
Figure 14	Mécanisme de La prolifération des cellules satellites	32
Figure 15	Activation du récepteur androgénique et synthèse des protéines contractiles	33
Figure 16	Mécanismes d'action et effets sur le muscle d'un entraînement de type musculation (ET) et/ou du dopage aux stéroïdes anabolisants	34
Figure 17	Le gène IGF-1	36

Figure 18	**Modifications de l'expression des gènes par les stéroïdes anabolisants**	**38**
Figure 19	**Différences entre les stéroïdes anabolisants légaux et les produits issus du marché noir**	**44**
Figure 20	**Effets dermatologiques et physiques des stéroïdes fabriqués au marché noir.**	**47**

Liste des abréviations

AAS	**Anabolic Androgenic Steroids (Stéroïdes anabolisants androgéniques)**
AF-1	**Activation Function 1**
AF-2	**Activation Function 2**
Akt	**Protéine kinase B**
Akt	**Protéine kinase B**
AR	**Récepteur Androgénique**
ARE	**Androgen Response Elements / Éléments de Réponse aux Androgènes**
ARNm	**Acide Ribonucléique messager**
DBD	**DNA Binding Domain / Domaine de Liaison à l'ADN**
ECG	**Électrocardiogramme**
FDA	**Food and Drug Administration**
G1/S	**Transition du cycle cellulaire entre la phase G1 et S**
GH	**Growth Hormone (Hormone de croissance)**
HDL	**High Density Lipoprotein**
hGH	**Human Growth Hormone (Hormone de croissance humaine)**
HSP	**Heat Shock Proteins / Protéines de Choc Thermique**
HSP70	**Heat Shock Protein 70**
HSP90	**Heat Shock Protein 90**
IGF-1	**Insulin-like Growth Factor 1/ Facteur de Croissance Analogue à l'Insuline1**
IMC	**Indice de Masse Corporelle**
LBD	**Ligand Binding Domain / Domaine de Liaison au Ligand**
LDL	**Low Density Lipoprotein**
mTOR	**mechanistic Target of Rapamycin**
MyoD	**Myogenic Differentiation**
NLS	**Nuclear Localization Signal / Signal de Localisation Nucléaire**
NTD	**Domaine N-terminal**
PI3K	**Phosphoinositide 3-Kinase**
ROS	**Reactive Oxygen Species / Espèces Réactives de l'Oxygène**
SNA	**Système Nerveux Autonome**
TAD	**Domaine de Transactivation**
VO2 max	**Volume maximal d'oxygène consommé**

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, la pratique du sport et de la musculation est devenue très populaire, surtout chez les jeunes. Plusieurs personnes pratiquent la musculation non seulement pour rester en bonne santé, mais aussi pour développer rapidement leur corps et améliorer leurs performances physiques. Cette situation a conduit certains sportifs à utiliser des compléments alimentaires et des hormones anabolisantes, notamment les stéroïdes androgéniques anabolisants (SAA) ainsi que différentes substances injectables.

Au départ, ces produits étaient destinés à un usage médical et utilisés sous surveillance spécialisée. Ils étaient fabriqués dans des laboratoires pharmaceutiques selon des normes précises afin de garantir leur qualité et leur sécurité. Ces substances servaient principalement à traiter certaines maladies comme les troubles hormonaux, les retards de croissance ou la perte importante de masse musculaire liée à certaines maladies chroniques. Même lorsqu'elles sont utilisées dans le domaine médical, la prise de ces hormones à des doses élevées peut provoquer plusieurs effets secondaires et perturber l'équilibre normal de l'organisme.

Avec les restrictions imposées sur la vente de ces produits sans ordonnance médicale, le marché noir s'est fortement développé. Beaucoup de personnes achètent aujourd'hui des produits injectables provenant de sources illégales sans connaître leur véritable composition. La plupart de ces produits illégaux sont fabriqués dans des laboratoires clandestins qui ne respectent pas les normes sanitaires ni les règles de fabrication pharmaceutique. Cela expose les utilisateurs à des produits de mauvaise qualité, parfois falsifiés, contaminés ou contenant des doses incorrectes **(Albano, et al,2021).**

Les risques liés à ces substances ne concernent pas seulement les problèmes visibles comme les maladies du foie, du cœur ou les troubles hormonaux. Une utilisation prolongée peut également provoquer des effets graves au niveau cellulaire et génétique. Certaines recherches montrent que ces produits peuvent augmenter le stress oxydatif, perturber la réparation de l'ADN et favoriser l'apparition de mutations génétiques ou d'autres maladies graves **(Bhasin et al., 2001).**

Problématique:

C'est précisément ce fossé entre usage médical encadré et consommation illégale non contrôlée qui constitue le point de départ de notre travail. Notre étude tente d'apporter des éléments de réponse à la question centrale suivante:

Quelles sont les propriétés chimiques et les mécanismes d'action des hormones anabolisantes injectables, et quels risques leur utilisation fait-elle peser sur la santé en particulier lorsque ces substances sont issues du marché noir ?

Nous nous pencherons également sur l'impact de ces produits à l'échelle de l'ADN, ainsi que sur les altérations génétiques susceptibles de survenir dans le cadre d'un usage abusif.

Pour répondre à ces interrogations, notre travail s'articule autour de trois chapitres:

- **Chapitre 1:** présente les caractéristiques chimiques et l'historique des hormones anabolisantes et des produits injectables, ainsi que leurs classifications et leurs mécanismes d'action biologiques.

- **Chapitre 2:** Ce chapitre est consacré aux effets de ces substances sur le patrimoine génétique: leurs interactions avec l'ADN, le stress oxydatif qu'elles engendrent, ainsi que les risques de mutations et de processus cancérogènes qui en découlent.

- **Chapitre3:** Nous y dressons une comparaison entre les stéroïdes anabolisants d'origine pharmaceutique et ceux circulant sur le marché noir, tout en détaillant les principales complications sanitaires associées à leur consommation.

Le document est finalisé par une conclusion générale.

.

Chapitre 1:

Caractéristiques chimiques et historiques des hormones anabolisantes et substances injectables

Les hormones anabolisantes sont utilisées principalement pour stimuler la croissance musculaire et améliorer les performances physiques. Ces hormones, dérivées de la testostérone, ont également été modifiées pour maximiser leurs effets anabolisants tout en minimisant les effets androgéniques indésirables. Cette partie présente une analyse détaillée des différents types d'hormones anabolisantes, leur fonctionnement, leurs mécanismes d'action et leurs exemples les plus courants (**Nora Cesbron, 20**17).

Les hormones anabolisantes se classent principalement en stéroïdes androgéniques anabolisants (SAA), dérivés synthétiques de la testostérone tels que la méthandrosténolone, l'oxandrolone, la boldénone, la nandrolone (19-nortestostérone) et la trenbolone, qui se lient aux récepteurs androgéniques pour stimuler la synthèse protéique via une modulation génomique. D'autres types incluent les hormones de croissance (GH), l'insuline et les agonistes des récepteurs aux androgènes, bien que les SAA représentent le groupe dominant par leur capacité à augmenter la masse musculaire et la force. Leur mécanisme d'action repose sur la diffusion passive dans les cellules cibles, où le complexe hormone-récepteur active la transcription d'ARNm traduits en protéines anabolisantes, avec des variations selon l'affinité et la cinétique de liaison (**Rizk, J., Sahu, R., & Duteil, D. 2023)**.

1-1 Hormones stéroïdes anabolisantes

1-1-1- Définition et structure chimique

Les hormones stéroïdes anabolisantes (SAA) sont des composés dérivés de la testostérone, l'hormone androgène principale. Elles sont modifiées chimiquement pour maximiser les effets anabolisants, tels que l'augmentation de la masse musculaire, tout en limitant les effets secondaires androgéniques. Ces modifications chimiques permettent d'augmenter l'efficacité de la testostérone, comme l'ajout de groupes méthyles qui prolongent leur durée d'action dans l'organisme **(Kicman, 2008).**

Les stéroïdes anabolisants partagent un noyau stéroïde à quatre cycles de carbone, et les modifications de leur structure chimique influencent directement leurs propriétés biologiques.

1-1-2 Fonctionnement et mécanismes d'action

Les stéroïdes anabolisants exercent leurs effets en se liant aux récepteurs androgènes présents dans les cellules musculaires. Ce lien active des voies de signalisation intracellulaires qui augmentent la synthèse des protéines, essentielles pour la réparation et la croissance des

muscles. (Figure1) La principale voie de signalisation impliquée est la voie mTOR, qui régule la croissance cellulaire et la synthèse des protéines (**Bhasin, 2001**).

Les stéroïdes anabolisants stimulent également la rétention de l'azote dans les muscles, ce qui est essentiel pour la formation de nouvelles protéines musculaires **(Kicman, 2008).**

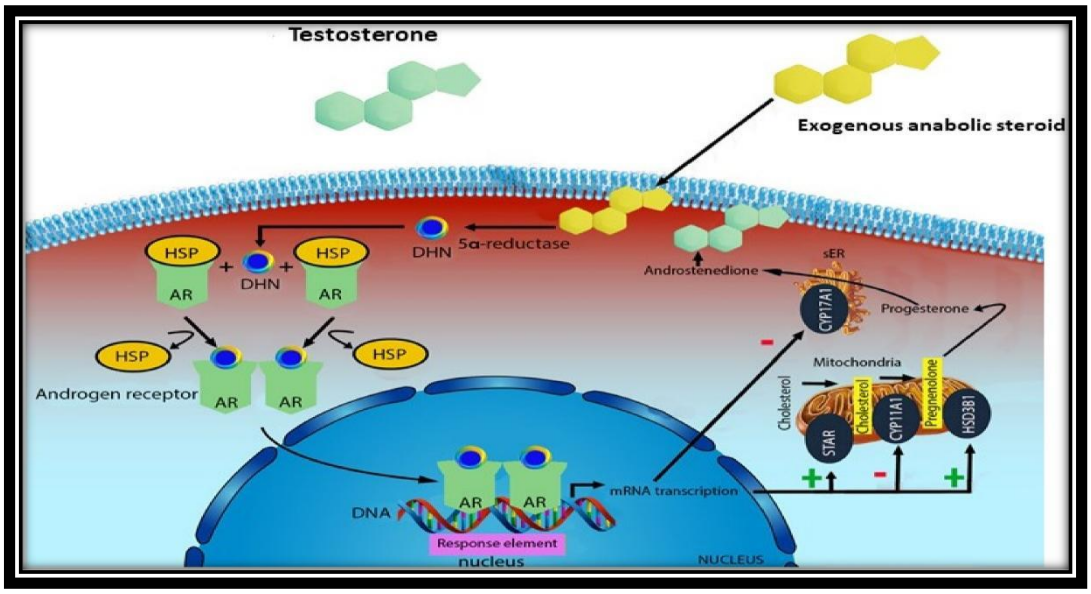


Figure 1: Mécanismes d'action des stéroïdes anabolisants en healthcare **(Albano, et al,2021)**

1-1-3 Exemples d'hormones stéroïdes anabolisantes

Les stéroïdes anabolisants les plus couramment utilisés dans le domaine médical et sportif comprennent:

-Testostérone: Hormone de base utilisée dans des préparations injectables telles que le cypionate de testostérone et l'énanthate de testostérone.

-Nandrolone: Moins androgénique, elle est largement utilisée pour son effet puissant sur la croissance musculaire.

-Methandrostenolone (Dianabol): L'un des stéroïdes les plus populaires pour augmenter rapidement la masse musculaire.

-Oxandrolone: Moins androgénique et utilisé pour maintenir la masse musculaire, notamment en cas de récupération post-chirurgicale **(Franceschini, 2009).**

1-2 Hormones peptidiques et non stéroïdes

1-2-1 Types de substances peptidiques

Les substances peptidiques, bien qu'elles ne soient pas des stéroïdes, possèdent également des propriétés anabolisantes puissantes. Elles incluent:

-Hormone de croissance (hGH): Produite par l'hypophyse antérieure, elle stimule la production d'IGF-1 (Insulin-like Growth Factor 1), un facteur de croissance essentiel pour l'anabolisme musculaire. (Figure 2)

-Insuline: Hormone clé dans la régulation du métabolisme du glucose et des acides aminés dans les muscles.

-Peptides de croissance: Comme le CJC-1295, qui stimule la production d'hGH pour améliorer la croissance musculaire (**Franceschini, 2016**).



Figure 2: Hormone de croissance **(Site 1)**

1-2-2 Mécanismes d'action spécifiques

-hGH: Stimule directement la production d'IGF-1, ce qui à son tour active la voie mTOR pour favoriser la synthèse des protéines dans les muscles.

-IGF-1: L'IGF-1 se lie aux récepteurs de type 1 de l'IGF, activant des cascades de signalisation qui induisent la synthèse des protéines et l'hypertrophie musculaire. (Figure 3)

-Insuline: Elle favorise l'absorption du glucose et des acides aminés dans les cellules musculaires, ce qui améliore l'anabolisme musculaire (**Saito, 2020**).

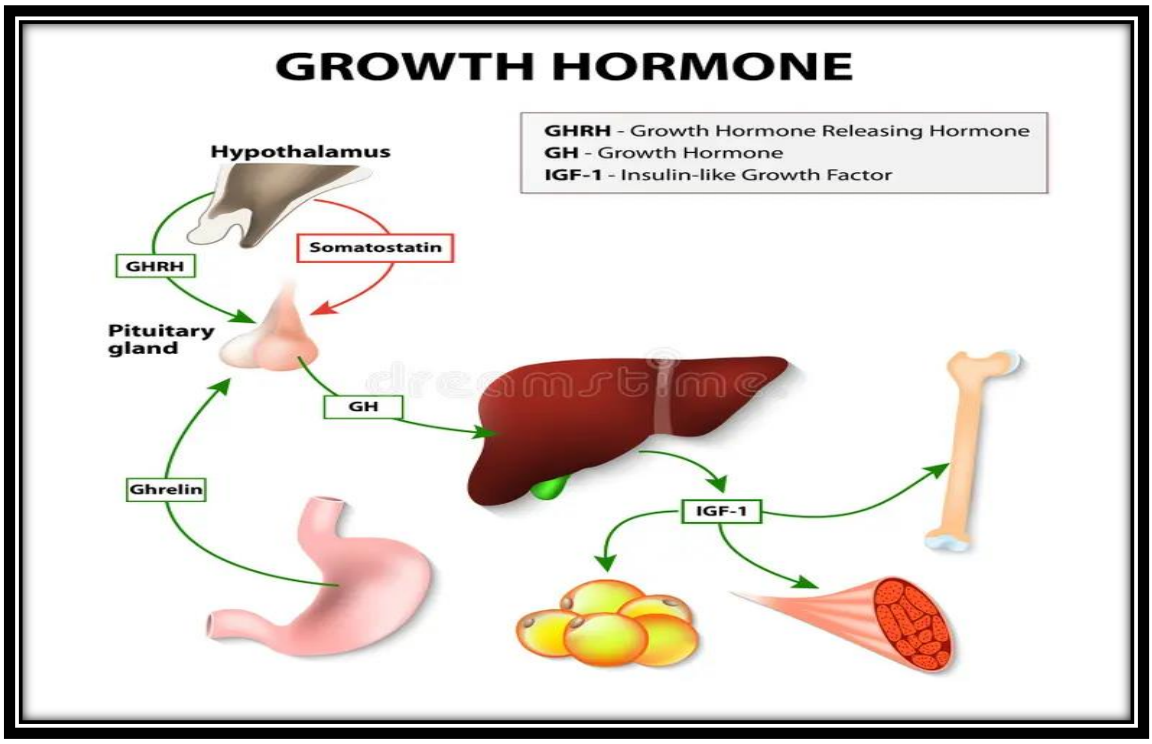


Figure 3: Mécanismes d'action de l'Hormone de croissance **(Site 2)**

1-2-3 Exemples d'hormones et substances non stéroïdes (Melvin H. Williams. Ergogenic Aids in Sport. Human Kinetics, 2005.)

-HGH (Hormone de croissance): Utilisée dans les traitements de déficience en croissance ou pour améliorer la performance sportive.

-Insuline: Largement utilisée pour ses propriétés anabolisantes dans des sports tels que la musculation.

-Peptides sécrétants de GH: Comme le CJC-1295, qui améliore la production d'hormone de croissance et soutient la croissance musculaire.

1-3 Autres substances anabolisantes injectables

1-3-1 Beta-2 agonistes

Les bêta-2 agonistes (Figure 4) comme **le Clenbutérol** sont utilisés pour leurs effets brûleurs de graisses et leur capacité à stimuler la masse musculaire maigre. Bien qu'ils soient principalement utilisés pour leurs propriétés bronchodilatatrices, leur action anabolique a été exploitée par certains athlètes pour améliorer leurs performances physiques **(WADA, 2019).**



Figure 4: Beta-2 agonistes **(Site 3)**

1-3-2 Inhibiteurs de la myostatine:

La myostatine est une protéine qui limite la croissance musculaire, et les inhibiteurs de la myostatine comme la follistatine sont utilisés pour augmenter l'hypertrophie musculaire. Ces agents inhibiteurs peuvent accélérer la croissance musculaire, même en l'absence d'un programme d'exercice intense **(Harrison, 2010).**

1-3-3 Autres agents modifiant la croissance musculaire

Des peptides myostatine-inhibiteurs, tels que la Follistatine, sont utilisés pour stimuler la croissance musculaire dans des environnements de recherche ou à des fins de dopage **(Genesis Pub, 2021)**

Les hormones anabolisantes, qu'elles soient stéroïdes ou peptides, jouent un rôle majeur dans la stimulation de la croissance musculaire et l'amélioration de la performance physique. Cependant, leur utilisation à des fins de dopage soulève des préoccupations éthiques et des risques pour la santé, notamment en raison de leurs effets secondaires à long terme. La

réglementation stricte de leur usage dans le sport vise à limiter ces risques et à garantir un terrain de jeu équitable pour tous les athlètes. **(Genesis Pub,2021)**

1-4 Caractéristiques chimiques des hormones anabolisantes

Les caractéristiques chimiques des hormones anabolisantes sont cruciales pour comprendre leurs effets sur la croissance musculaire et la performance physique. Chaque substance, qu'elle soit stéroïde anabolisant, peptide ou agent non stéroïde, a une structure chimique spécifique qui influence son efficacité et ses mécanismes d'action. Bien qu'efficaces pour augmenter la performance, l'utilisation de ces substances comporte des risques pour la santé, en particulier lorsqu'elles sont utilisées à des fins de dopage. **(StatPearls, 2025)**

1-4-1 Structure chimique des stéroïdes anabolisants

1-4-1-1 Cycle stéroïdien et modifications chimiques

Les stéroïdes anabolisants possèdent un noyau de base appelé cyclopentano-perhydrophénanthrène, qui se compose de quatre cycles carbonés. Ce noyau est commun à toutes les hormones stéroïdes, (Figure 5) telles que les corticoïdes, les hormones sexuelles (comme la testostérone) et les progestatifs. Les modifications chimiques sur ce noyau stéroïde permettent de créer des dérivés ayant des effets biologiques variés. Ces modifications ont principalement pour but de réduire les effets androgéniques (effets secondaires tels que la croissance excessive des poils ou la calvitie) tout en augmentant les effets anabolisants (croissance musculaire).

Par exemple, l'ajout de groupes méthyles (par exemple, à la position 17α) ou la modification de la chaîne latérale du noyau stéroïdien permet de prolonger l'activité de la molécule ou de modifier son affinité pour les récepteurs androgènes. Ces modifications rendent certains stéroïdes plus stables et plus puissants que la testostérone naturelle **(Kicman, 2008).**

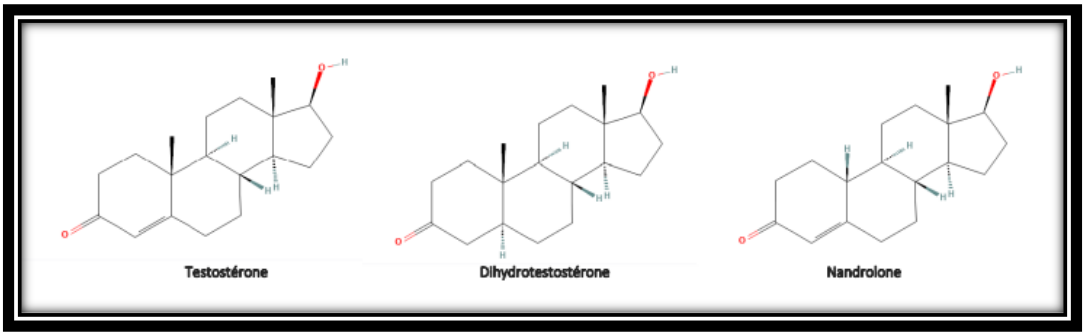


Figure 5: Structures des principaux stéroïdes naturels **(endogènes) (Graham-2012)**

1-4-1-2 Dérivés de la testostérone et leurs propriétés

Les dérivés de la testostérone sont les stéroïdes anabolisants les plus courants. Leur structure chimique modifiée permet de maximiser les effets anabolisants tout en réduisant les effets secondaires androgéniques. Voici quelques exemples des dérivés de testostérone utilisés couramment:

-**Testostérone énathate et testostérone cypionate**: Ces formes d'injections sont utilisées pour augmenter la masse musculaire, car elles sont libérées lentement dans le corps, permettant des niveaux constants de testostérone.

-**Nandrolone:** Un dérivé de la testostérone, avec une modification chimique qui diminue ses effets androgéniques tout en améliorant ses effets anabolisants. La nandrolone décanoate est particulièrement utilisée dans la médecine pour aider à la croissance musculaire et pour traiter les affections musculaires dégénératives.

-Methandrostenolone (Dianabol): Il s'agit d'un stéroïde très puissant pour augmenter rapidement la masse musculaire, mais avec des effets androgéniques plus marqués.

Ces dérivés modifiés peuvent avoir une demi-vie plus longue et des effets plus ciblés, ce qui leur permet de maintenir des niveaux stables de testostérone dans le corps sur des périodes prolongées. **(Medscape, 2023)**

1-4-2 Les mécanismes d'action biochimique

1-4-2-1 Interaction avec les récepteurs androgènes

Les stéroïdes anabolisants exercent leurs effets physiologiques en se liant aux récepteurs androgènes dans les cellules musculaires. **(Figure 6)** Cette interaction est cruciale pour initier les effets anabolisants. Une fois liés, les stéroïdes anabolisants modifient l'expression génique en activant la transcription des gènes de la synthèse des protéines. Cela conduit à l'augmentation de la production de protéines musculaires, favorisant ainsi la réparation des fibres musculaires après l'exercice physique et l'hypertrophie musculaire (croissance des muscles).

Les récepteurs androgènes se trouvent dans le noyau des cellules musculaires, et la liaison des stéroïdes à ces récepteurs conduit à des changements dans le métabolisme cellulaire. Cette interaction active plusieurs voies de signalisation intracellulaires, telles que la voie mTOR,

qui est responsable de l'initiation de la synthèse des protéines et de la croissance cellulaire (**Kicman, 2008).**

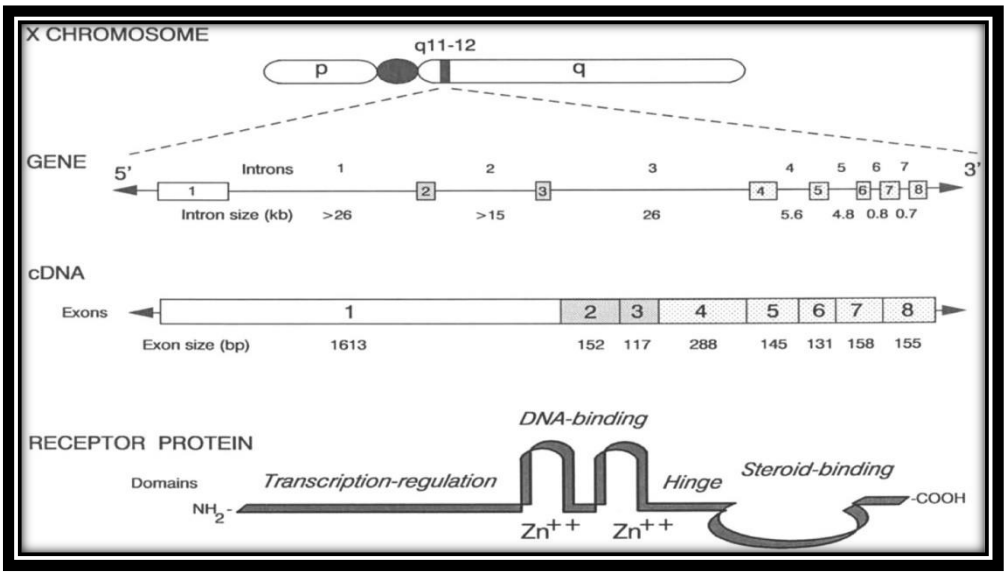


Figure 6: Représentation schématique du récepteur des androgènes, avec ses différents domaines. **(Quigley et al.1995)**

1-4-2-2 Effet sur la synthèse des protéines musculaires

L'activation des récepteurs androgènes par les stéroïdes anabolisants entraîne une série de réactions biochimiques qui augmentent la synthèse des protéines musculaires (Figure7). Cette activation conduit à une rétention accrue de l'azote dans les muscles, un élément clé pour la croissance des tissus. L'azote est un composant essentiel des acides aminés, qui sont les éléments de base des protéines musculaires.

Ce processus d'anabolisme est crucial pour le développement musculaire, car il favorise la réparation des muscles après un exercice intense et augmente leur taille et leur force au fil du temps. Simultanément, les stéroïdes anabolisants réduisent le catabolisme, c'est-à-dire la dégradation des protéines, contribuant ainsi à un environnement favorable à la croissance musculaire **(Kicman, 2008).**

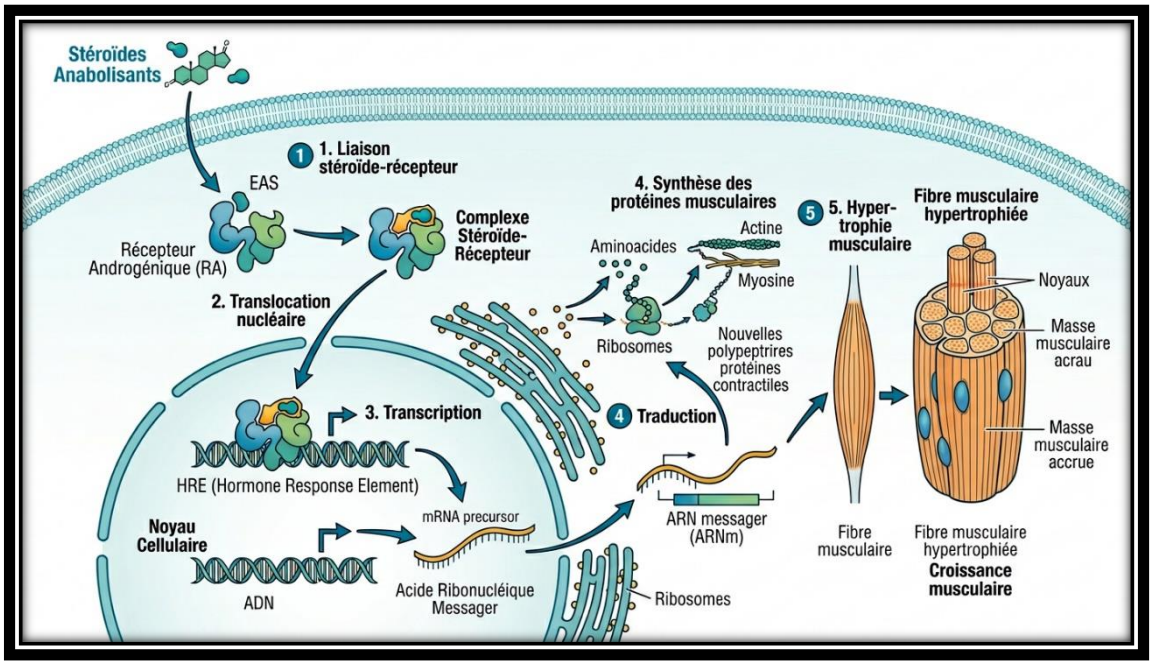


Figure 7: Mécanisme d'action des stéroïdes anabolisants sur la synthèse des protéines musculaires **(Vujovic 2026)**

1-4-3 Substances peptidiques et leurs structures

1-4-3-1 Mécanismes d'action des hormones de croissance

L'hormone de croissance (**hGH)** est produite par l'hypophyse antérieure et joue un rôle majeur dans la croissance des tissus et des muscles. Lorsqu'elle est libérée dans la circulation sanguine, l'**hGH** stimule la production de IGF-1 (Insulin-like Growth Factor 1) dans le foie. IGF-1 est le principal médiateur des effets anabolisants de l'**hGH**, favorisant la synthèse des protéines musculaires et la croissance cellulaire. (Figure8)

L'hormone de croissance agit en activant la voie PI3K/Akt/mTOR, qui régule la synthèse des protéines musculaires et améliore la récupération après un exercice intense (**Saito, 2020**).

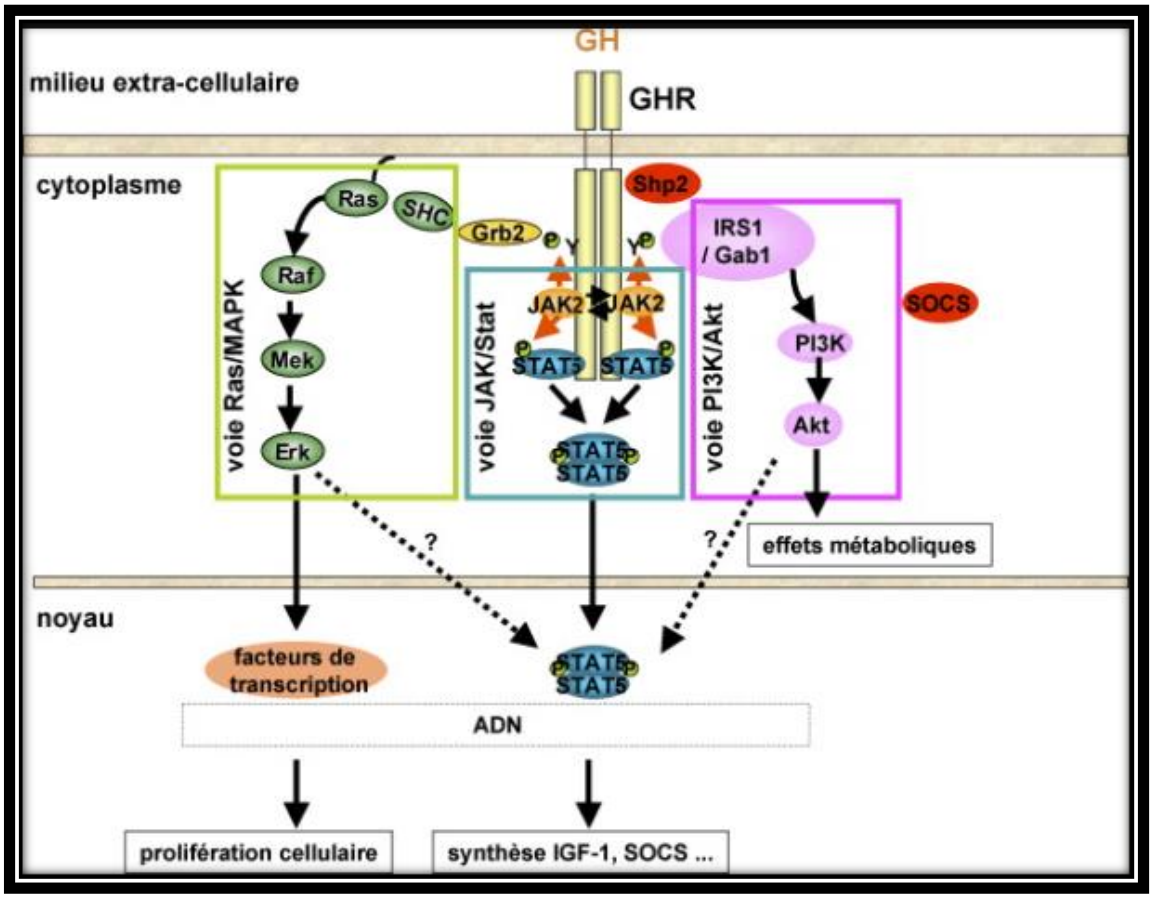


Figure 8: Mécanismes d'action des hormones de croissance **(Site 4)**

1-4-3-2 Effets des peptides sur la croissance cellulaire et la réparation musculaire

Les peptides comme CJC-1295 et Ipamorelin sont utilisés pour stimuler la libération de l'hormone de croissance. Ces peptides augmentent la production pulsatile de GH, ce qui permet une stimulation plus efficace de la synthèse des protéines musculaires. Ils améliorent également la réparation musculaire et la régénération cellulaire, ce qui accélère la récupération après des séances d'entraînement intensif. Les peptides anabolisants agissent en augmentant la libération d'hormones naturelles du corps, ce qui permet de moduler la croissance musculaire de manière plus naturelle et moins invasive que les stéroïdes anabolisants. (**Genesis Pub, 2021**).

1-4-4 Autres caractéristiques chimiques des substances injectables

1-4-4-1 Propriétés pharmacologiques des agents non stéroïdes

Les agents non stéroïdes, tels que les bêta-2 agonistes (ex. Clenbutérol) et les inhibiteurs de la myostatine (ex. Follistatine), agissent différemment des stéroïdes anabolisants classiques. Les

bêta-2 agonistes sont connus pour leurs propriétés bronchodilatatrices mais sont également utilisés pour augmenter la masse musculaire. Ils stimulent la lipolyse et améliorent l'oxygénation musculaire, ce qui peut conduire à une meilleure performance physique dans des activités comme la musculation et l'endurance (**WADA, 2019**).

Les inhibiteurs de la myostatine, comme la follistatine, bloquent une protéine qui limite la croissance musculaire. Cette action permet une augmentation substantielle de la masse musculaire, ce qui en fait une cible potentielle dans le traitement de maladies musculaires dégénératives et pour améliorer la performance dans le sport (**Genesis Pub, 2021**).

1-4-4-2 Impact sur la croissance musculaire et la performance

L'impact des agents non stéroïdes sur la croissance musculaire et la performance est principalement dû à leur capacité à augmenter la masse musculaire maigre et à réduire la masse grasse. Ces substances, notamment les bêta-2 agonistes et les inhibiteurs de la myostatine, sont prisées dans des contextes de dopage sportif pour leur efficacité à augmenter rapidement les performances physiques tout en minimisant les effets secondaires indésirables des stéroïdes traditionnels (**Sader et al, 2001).**

1-5 Historique des hormones anabolisantes

L'histoire des hormones anabolisantes est marquée par une évolution rapide, du développement des premières testostérones synthétiques à l'introduction des stéroïdes anabolisants dans le sport. Bien que ces substances aient été initialement conçues à des fins médicales, leur usage à des fins de dopage a posé des défis considérables pour les régulateurs sportifs et les autorités de santé publique. L'introduction de tests antidopage et de législations strictes a eu un impact significatif sur leur utilisation, mais le combat contre les abus de ces substances continue d'être une priorité **(Bhasin et al., 2001).**

1-5-1 Découverte et premiers usages médicaux des hormones anabolisantes

1-5-1-1 Premières recherches sur la testostérone

La testostérone, hormone clé dans le développement des caractéristiques sexuelles masculines et la croissance musculaire, a été découverte en 1935 par les chercheurs allemands Adolf Windaus et Hermann Müller. Leur travail a permis d'isoler cette hormone stéroïde à partir de la bile des animaux, ouvrant la voie à des recherches sur son rôle physiologique et ses applications thérapeutiques (**Bhasin et al., 2001**).

La testostérone a rapidement suscité un intérêt médical, notamment pour le traitement des troubles de la fonction sexuelle masculine et des maladies liées à l'atrophie musculaire. À cette époque, il était déjà connu que l'injection de testostérone pouvait favoriser l'augmentation de la masse musculaire, mais son utilisation n'était pas encore généralisée **(Kicman, 2008).**

1-5-1-2 Les premières utilisations thérapeutiques dans les années 1950

Dans les années 1950, la testostérone synthétique a été introduite pour le traitement de diverses pathologies, notamment pour les hommes souffrant de déficit androgénique. L'utilisation de la testostérone dans le cancer de la prostate et les troubles hormonaux masculins était répandue, et les médecins ont commencé à l'utiliser pour traiter les troubles de la croissance musculaire et la dénutrition liée à des maladies chroniques.

Les stéroïdes anabolisants ont également été utilisés pour stimuler la croissance musculaire chez les patients convalescents ou chez ceux souffrant de maladies telles que la tuberculose et l'atrophie musculaire. La demande croissante pour ces produits a conduit au début des recherches sur la création de dérivés plus puissants et ciblés (**Kanayama G, et al 2020**).

1-5-2 L'ère de l'expansion des stéroïdes dans les années 1960 et 1970

1-5-2-1 Utilisation dans le sport de haut niveau

Les stéroïdes anabolisants ont commencé à être utilisés de manière répandue dans les années 1960, principalement dans des contextes de sport de haut niveau et de compétitions de force. Les athlètes de sports comme l'haltérophilie, le bodybuilding et l'athlétisme ont commencé à recourir à ces substances pour améliorer leurs performances, augmenter leur masse musculaire et réduire la fatigue **(Maughan, R.J. et al, 2004, Butenandt A., Ruzicka L. 1935, Hoberman J. 2005)).**

La testostérone et ses dérivés étaient particulièrement recherchés pour leur capacité à augmenter la production de globules rouges et améliorer l'endurance. À partir des années 1970, les athlètes professionnels dans plusieurs disciplines sportives ont commencé à s'injecter des stéroïdes dans l'espoir de gagner un avantage compétitif (**Pope H.G., et al., 2014).**

1-5-2-2 L'introduction des stéroïdes dans les compétitions sportives

Le dopage par les stéroïdes anabolisants (Figure 9) a fait son apparition dans de nombreuses compétitions sportives de haut niveau à la fin des années 1960. Les athlètes ont rapidement compris les avantages potentiels des stéroïdes pour améliorer leur force musculaire et leur performance physique **(Maughan, R.J. et al, 2004).**

En 1967, la fédération internationale d'athlétisme a été la première organisation à interdire l'utilisation des stéroïdes dans les compétitions, bien que leur utilisation continue de croître en secret. Dans les années 1970 et 1980, d'autres sports ont suivi en mettant en place des réglementations contre le dopage, mais ces substances continuaient à être largement utilisées **(Pope, 2014).**

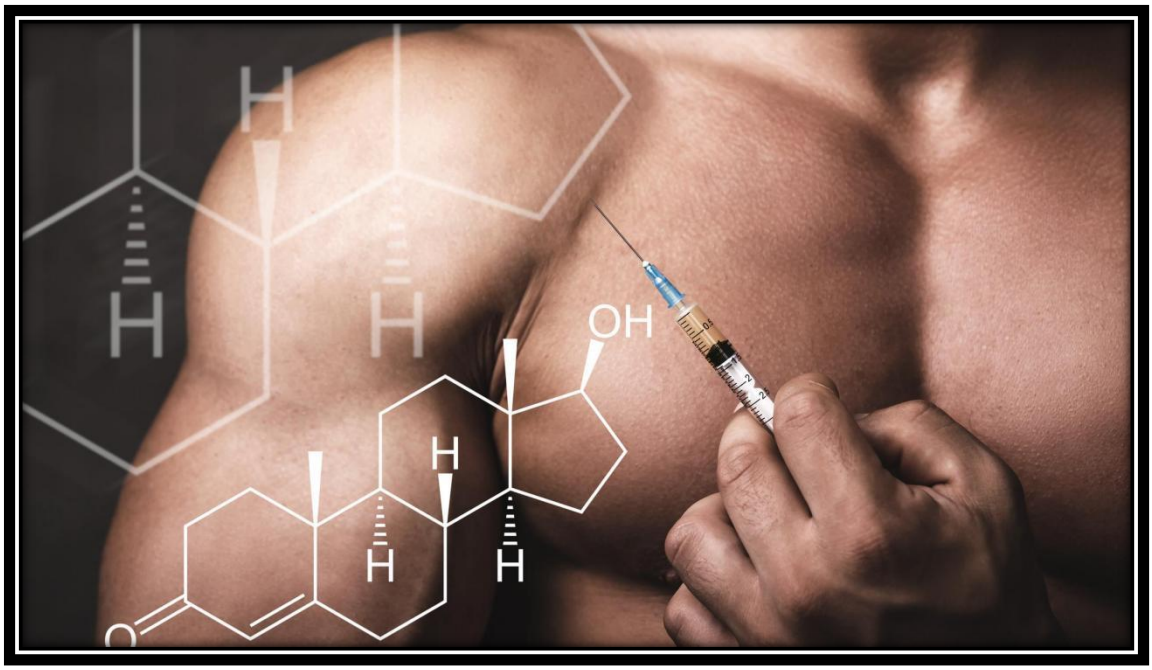


Figure 9: Le dopage par les stéroïdes anabolisants **(Site 5)**

1-5-3 L'impact de la découverte de la synthèse chimique des dérivés anabolisants

1-5-3-1 Développement des premiers stéroïdes anabolisants synthétiques

À partir des années 1950, des chercheurs ont commencé à développer des stéroïdes anabolisants synthétiques pour améliorer l'efficacité des traitements médicaux tout en minimisant les effets secondaires. Ces stéroïdes étaient conçus pour maximiser les effets anabolisants (favorisant la croissance musculaire) tout en minimisant les effets androgéniques (responsables des caractéristiques sexuelles secondaires masculines) (**Kicman 2008**).

Les premiers dérivés synthétiques, comme la métandiénone (Dianabol), ont permis aux athlètes d'obtenir des résultats rapides en termes de gain musculaire et de performance physique. Ces dérivés ont joué un rôle majeur dans la révolution des stéroïdes dans le sport au cours des années 1960 et 1970 (**Franceschini et al 2009).**

1-5-3-2 Amélioration des propriétés pharmacologiques et réduction des effets secondaires

Les recherches ont permis de concevoir des stéroïdes ayant des propriétés pharmacologiques améliorées, notamment des formulations qui permettaient une libération prolongée et une dissipation plus lente dans l'organisme. Cela a permis de maximiser les effets bénéfiques sur la croissance musculaire et la récupération tout en réduisant certains des effets secondaires comme l'acné, l'hypertension ou les problèmes de fertilité. Certains dérivés, comme la nandrolone, ont été créés pour réduire les effets secondaires liés aux caractéristiques sexuelles secondaires masculines, tout en augmentant les effets anabolisants, favorisant ainsi la croissance musculaire **(Kicman A.T.,2008).**

1-5-4 L'essor et les abus dans les années 1980 et 1990

1-5-4-1 Utilisation massive dans les sports de force et le bodybuilding

Les années 1980 et 1990 ont vu une augmentation massive de l'utilisation des stéroïdes dans les sports de force, notamment le bodybuilding. Des athlètes professionnels ont intensifié l'utilisation des stéroïdes pour obtenir des gains musculaires extrêmes et pour maintenir leur performance au plus haut niveau. Cela a conduit à des pratiques de dopage de plus en plus courantes, bien que souvent secrètes **(Maughan, R.J. et al, 2004)**.

La popularité des stéroïdes dans le bodybuilding a conduit à un phénomène de surconsommation et à une normalisation de leur usage, en particulier dans les sports de force, où les gains musculaires sont essentiels à la performance.

1-5-4-2 L'introduction des tests antidopage et leur impact

La montée en puissance des abus de stéroïdes a poussé les autorités sportives à mettre en place des tests antidopage dans les années 1990. Ces tests ont été conçus pour détecter les substances interdites dans les échantillons d'urine et de sang des athlètes. L'impact des tests antidopage a été significatif, car ils ont réduit l'usage des stéroïdes dans certains sports, tout

en incitant à l'utilisation de substances de plus en plus difficiles à détecter **(Pope H.G., et al., 2014).**

1-5-5 Législation et régulation des hormones anabolisantes

1-5-5-1 Législation mondiale sur les stéroïdes anabolisants

Depuis les années 1990, plusieurs gouvernements et organisations internationales, y compris la WADA (World Anti-Doping Agency) et la FDA (Food and Drug Administration), ont mis en place des lois strictes interdisant l'usage de stéroïdes anabolisants à des fins de dopage sportif. Ces lois visent à protéger la santé publique et à garantir des compétitions sportives équilibrées et sans tricherie **(Maughan, R.J. et al, 2004, et WADA, 2020).**

1-5-5-2 Le rôle des agences de régulation (ex: FDA, WADA)

La WADA joue un rôle central dans la régulation des substances interdites, en publiant des listes annuelles des substances dopantes et en coordonnant les efforts antidopage dans le monde entier. La FDA, quant à elle, régule la commercialisation des stéroïdes anabolisants aux États-Unis et veille à leur usage thérapeutique uniquement (**Sader MA, Griffiths KA, et al. 2001**).

1-5-5-3 Approches de lutte contre le dopage et les substances interdites

Les stratégies actuelles pour lutter contre le dopage incluent des tests réguliers sur les athlètes, des campagnes de sensibilisation et des sanctions sévères pour les athlètes pris en flagrant délit de dopage. Des approches innovantes telles que l'analyse de la biomédecine et la thérapie génique sont aussi explorées pour contrer l'utilisation illégale des stéroïdes **(WADA, 2020, et FDA, 2019).**

1-6 Applications thérapeutiques des hormones anabolisantes

Les hormones anabolisantes ont été développées à l'origine pour traiter certaines pathologies médicales, notamment celles liées à la perte musculaire, à l'hypogonadisme et à la dénutrition. Elles ont également trouvé des applications dans le domaine de la médecine sportive, où elles sont utilisées pour améliorer la récupération et les performances. Toutefois, leur usage en dehors des indications médicales a soulevé des questions éthiques et des préoccupations de santé.

1-6-1 Traitement des maladies liées à la perte musculaire

1-6-1-1 Utilisation en médecine pour les patients souffrant de cachexie ou d'atrophie musculaire

Les stéroïdes anabolisants sont couramment utilisés pour traiter des conditions médicales où la perte musculaire est sévère, telles que la cachexie (perte de poids extrême et dégradation musculaire souvent liée à des maladies chroniques comme le cancer, le SIDA ou les maladies cardiaques) et l'atrophie musculaire. Ces conditions entraînent une perte progressive de la masse musculaire, réduisant la capacité des patients à effectuer des activités quotidiennes (**Bhasin S, 2001, Goldberg ,2012).**

Les stéroïdes anabolisants, en particulier la nandrolone et l'oxandrolone, ont montré une efficacité clinique dans la récupération musculaire et l'amélioration de l'appétit et de l'énergie des patients. Leur capacité à stimuler la synthèse des protéines musculaires et à réduire la dégradation des protéines en fait un traitement précieux dans ces situations cliniques.

1-6-1-2 Substituts hormonaux dans le traitement de l'hypogonadisme masculin

L'hypogonadisme masculin, une condition où les testicules ne produisent pas suffisamment de testostérone, est traité par des substituts hormonaux, souvent sous forme de testostérone ou de dérivés de la testostérone. Ce traitement est essentiel pour restaurer les niveaux hormonaux et améliorer la masse musculaire, la force et la fonction sexuelle.

La testostérone et ses dérivés sont administrés sous forme d'injections, de gels ou de patchs transdermiques. Ces traitements permettent d'améliorer les symptômes associés à l'hypogonadisme, tels que la diminution de la libido, la fatigue et la perte de masse musculaire. (**Kicman A.T., (2008). Maughan R.J, 2004)**.

1-6-2 Applications en médecine sportive

Les stéroïdes anabolisants ont été largement utilisés dans la médecine sportive pour traiter des blessures, améliorer les performances et accélérer la récupération.

1-6-2-1 Récupération après blessures et chirurgie

Les stéroïdes anabolisants jouent un rôle crucial dans la récupération après des blessures ou des interventions chirurgicales, en particulier dans les cas de détérioration musculaire. Après une blessure musculaire, les stéroïdes anabolisants favorisent la réparation des tissus

musculaires et aident à restaurer la fonction musculaire plus rapidement. L'oxandrolone et la nandrolone sont couramment utilisés dans ces situations pour accélérer la réhabilitation et minimiser la perte de masse musculaire due à l'immobilisation **(Franceschini L., 2009. Bhasin S., 2001**).

1-6-2-2 Utilisation dans la performance des athlètes (avant l'ère des tests antidopage)

Avant l'introduction des tests antidopage dans les années 1960, les stéroïdes anabolisants étaient largement utilisés pour améliorer les performances des athlètes, notamment dans les sports de force (haltérophilie, bodybuilding) et les sports d'endurance. Ces substances permettent d'augmenter la masse musculaire, la force et la récupération entre les séances d'entraînement. L'usage des stéroïdes dans le sport de haut niveau a été particulièrement populaire avant la mise en place de tests pour détecter ces substances (**Pope H.G., et al. 2014. Maughan R.J., 2004**).

1-6-3 Éthique et controverses autour de l'usage des substances anabolisantes en médecine

L'utilisation des stéroïdes anabolisants en médecine soulève des questions éthiques, surtout lorsqu'ils sont utilisés à des fins non thérapeutiques ou dans des sports compétitifs. Bien que les stéroïdes soient efficaces pour traiter des pathologies comme l'hypogonadisme et la cachexie, leur utilisation dans le sport est controversée en raison des risques pour la santé, de l'inégalité compétitive qu'ils peuvent créer et des conséquences sur la santé publique.

De plus, l'utilisation des stéroïdes à des fins esthétiques ou pour améliorer les performances, sans prescription médicale, est illégale dans de nombreuses juridictions et peut entraîner des effets secondaires graves (**Pope H.G., 2000. Et Maughan R.J., 2004**).

1-7 Abus d'hormones anabolisantes dans le sport et ses conséquences

Les hormones anabolisantes ont des applications thérapeutiques précieuses dans le traitement de certaines conditions médicales, mais leur abus dans le sport présente des risques considérables pour la santé des utilisateurs. En dépit de leur efficacité pour améliorer la performance, leur utilisation à des fins non médicales soulève de nombreuses questions éthiques et impacte négativement l'image des sports (**Maughan R.J., 2004**).

1-7-1 L'impact sur la performance sportive

-Les stéroïdes anabolisants sont largement utilisés dans des sports où la force musculaire et la masse musculaire sont cruciales. Leur capacité à stimuler la synthèse des protéines permet des gains musculaires rapides et une augmentation de la force, permettant ainsi aux athlètes de performer à un niveau plus élevé (**Bhasin S., 2001**).

-Outre l'augmentation de la masse musculaire, les stéroïdes anabolisants améliorent également l'endurance et la récupération entre les efforts intenses. En réduisant la dégradation musculaire et en augmentant la rétention de l'azote, ces substances permettent aux athlètes de maintenir des niveaux de performance élevés sur de longues périodes (**Franceschini L., 2009**).

1-7-2 Les risques pour la santé des utilisateurs

-L'abus de stéroïdes anabolisants peut entraîner de graves effets secondaires, tant à court terme qu'à long terme. Parmi les effets à court terme, on trouve l'agressivité, l'irritabilité, et des troubles hormonaux. À long terme, les utilisateurs peuvent développer des problèmes cardiovasculaires, des dysfonctionnements du foie et des troubles endocriniens (**Maughan R.J., 2004)**.

-L'abus de stéroïdes peut également entraîner une dépendance, avec des troubles psychiatriques associés, comme l'anxiété, la dépression et l'agressivité extrême. Ce phénomène, souvent appelé "roid rage", est une conséquence bien documentée de l'usage prolongé de ces substances (**Pope H.G., 2014).**

1-7-3 L'impact de l'abus de stéroïdes sur la réputation des sports

-L'usage des stéroïdes anabolisants a entraîné plusieurs scandales de dopage, comme ceux impliquant des athlètes célèbres dans le cyclisme, l'athlétisme et le bodybuilding. Ces scandales ont entaché l'image du sport et ont conduit à des réglementations strictes sur le contrôle antidopage (**Maughan R.J., 2004**).

-Les abus de stéroïdes ont non seulement affecté la santé des athlètes, mais ont également détérioré l'image du sport et des athlètes professionnels. La perception de l'intégrité du sport a été fortement altérée, et les athlètes qui se sont dopés ont été stigmatisés pour leur comportement (**Pope H.G., 2014**).

1-8 la fabrication des stéroïdes anabolisants sur le marché noir:

Les stéroïdes anabolisants, conçus à l'origine pour des usages thérapeutiques précis, font aujourd'hui l'objet d'une production et d'une diffusion importantes en dehors des circuits pharmaceutiques légaux. Sur le marché noir, ces produits sont généralement fabriqués dans des conditions peu contrôlées, sans garanties réelles de qualité ni d'hygiène. Du coup, leur composition et leur dosage peuvent varier d'un produit à un autre, ce qui les rend encore plus dangereux. Les utilisateurs ne sont pas seulement exposés aux effets des stéroïdes eux-mêmes, mais aussi à des dangers liés à la présence d'impuretés ou de produits falsifiés. De plus, leur circulation dans des réseaux illégaux représente un problème pour la santé publique et la réglementation, et favorise leur utilisation croissante, notamment dans le domaine de la musculation et du sport **(Magnolini R., et al. Fake 2022).**

1-8-1 Production illicite des stéroïdes anabolisants et conséquences sur la santé:

Les stéroïdes anabolisants androgéniques (AAS) sont des substances de synthèse conçues en laboratoire, imitant la testostérone, une hormone produite naturellement par le corps humain. Cette hormone est cruciale pour le développement musculaire ainsi que pour l'apparition des caractéristiques sexuelles masculines.

D'un point de vue médical, les AAS sont utilisés uniquement dans des contextes spécifiques, tels que les troubles hormonaux, l'anémie ou encore la perte significative de masse musculaire liée à certaines pathologies. Leur usage est donc limité à des cas précis, sous surveillance médicale stricte.

Cependant, en dehors du cadre thérapeutique, les AAS connaissent une utilisation accrue dans les domaines du sport et de la musculation. Nombreuses sont les personnes qui recourent à ces substances dans le but d'accélérer la prise de masse musculaire, d'augmenter leur force physique ou d'améliorer leur apparence corporelle. Cette pratique est souvent influencée par la pression sociale véhiculée par les réseaux sociaux et par la quête d'un idéal corporel jugé « parfait ».

Néanmoins, malgré les bénéfices immédiats qu'ils peuvent offrir, l'utilisation des AAS comporte des risques importants pour la santé, notamment en l'absence de suivi médical. Ils peuvent entraîner des perturbations hormonales, des complications cardiovasculaires, ainsi que des effets psychologiques, tels que des variations d'humeur et des troubles du

comportement. Ces risques soulignent la nécessité d'une vigilance accrue et d'une régulation stricte de leur utilisation **(WADA: World Anti-Doping Agency, 2020).**

1-8-2 Le marché noir des stéroïdes anabolisants:

1-8-2-1 Existence et portée

Dans certains pays où les stéroïdes anabolisants sont interdits ou seulement vendus avec une ordonnance, la plupart de ceux qu'on trouve viennent du marché illégal. Souvent, ils sont fabriqués dans des endroits clandestins ou importés de pays où les lois sont plus flexibles. Ensuite, ils sont revendus un peu partout, surtout dans les salles de sport, sur Internet, ou parfois même directement entre personnes **(McGinnis, J. A., et al. 2013).**

1-8-2-2 Produits contrefaits et de mauvaise qualité

Les analyses sur les stéroïdes vendus sur le marché noir montrent que beaucoup de ces produits ne sont pas fiables. En général, ils sont soit contrefaits, soit de mauvaise qualité par rapport à ce qui est écrit sur l'étiquette. Parfois, il n'y a même pas le bon produit dedans, ou bien la dose n'est pas correcte. Et dans certains cas, il peut y avoir une autre substance à la place. On a aussi vu dans plusieurs études que le taux de contrefaçon peut être élevé, entre 18 % et 86 %. En plus, ces produits peuvent être contaminés (métaux lourds ou bactéries), ce qui les rend encore plus dangereux **(Lorenzo, J. M., et al. (2011).**

1-8-3 Processus de fabrication

Les stéroïdes du marché noir sont fabriqués dans des endroits illégaux, sans respect des règles de sécurité ni de qualité.

En général, ils sont faits à partir de poudre brute de stéroïdes. Cette poudre est ensuite mélangée avec des huiles ou des solvants comme l'huile de soja ou de coton afin d'obtenir des produits injectables.

Ensuite, ils sont vendus sous forme de fioles ou de comprimés, mais sans aucun contrôle sur la qualité, la stérilité ou la dose réelle du produit. **(McGinnis, J. A., et al. (2013).)**



Figure 10: Les stéroïdes anabolisants du marché noir (TRENBOLONE) **(Site 6)**

Chapitre 2:

Effets génétiques des hormones anabolisantes

Pendant longtemps, les hormones anabolisantes (Ces dérivés de la testostérone) n'avaient qu'un usage bien précis: c'est de traiter certains retards de croissance, des carences hormonales ou des maladies entraînant une fonte musculaire. Aujourd'hui, elles sont surtout connues pour une tout autre raison: leur usage détourné dans le sport et la quête effrénée de la performance. Mais derrière ce tableau déjà préoccupant se cache une réalité encore plus profonde, et bien moins médiatisée ce que ces substances font à l'intérieur même de nos cellules, au niveau du génome (**Ilieve et al. 2026**).

2-1 Interaction avec l'ADN:

Les hormones anabolisantes, principalement les stéroïdes androgènes comme la **testostérone** et ses dérivés synthétiques (stanozolol, nandrolone, méthandiénone), se distinguent par leur capacité à agir directement sur le matériel génétique de la cellule. Contrairement aux hormones peptidiques (qui se fixent à des récepteurs membranaires et activent des second messagers), les stéroïdes sont des **molécules lipophiles**. Cette propriété leur permet de traverser passivement la bicouche lipidique de la membrane plasmique sans nécessiter de transporteur actif (Leur petite taille et leur hydrophobicité sont les conditions physicochimiques essentielles à leur mode d'action génomique direct) (**Andreassen TK. 2006)**.

Les anabolisants agissent en se fixant sur les récepteurs aux androgènes, qui fonctionnent comme des interrupteurs génétiques: ils activent ou inhibent certains gènes, déclenchant des cascades moléculaires responsables notamment de la croissance musculaire (**Nishida Y, et al. 2024**).

Au-delà de leurs effets immédiats, ils induisent des modifications épigénétiques persistantes voire transmissibles à la génération suivante avec des risques de cancers hormono-dépendants, de dérèglements métaboliques et d'atteintes à la lignée germinale (**Andreassen TK. 2006)**.

2-1-1-Passage de l'hormone à travers la membrane cellulaire:

Une fois à l'intérieur de la cellule musculaire, l'hormone se lie à un récepteur spécifique appelé **récepteur androgénique (AR)**. Ce récepteur se trouve initialement dans le cytoplasme sous une forme inactive, associée à des protéines chaperonnes (notamment les protéines de choc thermique HSP – Heat Shock Proteins: HSP70, HSP90, etc). La liaison de l'hormone provoque un changement de conformation du récepteur (Le domaine LBD se referme sur l'hormone, c'est un phénomène de « thermodynamic switch » ou « interrupteur

thermodynamique »), ce qui entraîne la dissociation des protéines chaperonnes et l'activation du complexe hormone-récepteur (**Heinlein CA, Chang C, 2002, Ghaibour K, et al. (2023**).

2-1-2- Structure du récepteur androgénique (AR)

Le récepteur aux androgènes (AR) est un facteur de transcription appartenant à la superfamille des récepteurs nucléaires. Chez l'humain, il est codé par le gène AR, localisé sur le chromosome X. Sa structure est organisée en quatre domaines fonctionnels principaux (**Andreassen, 2006**):

a) **Le domaine N-terminal (NTD)**: Également appelé domaine de transactivation (TAD), il constitue l'extrémité N-terminale de la protéine (région A/B). Il porte la fonction d'activation AF-1, indispensable à l'initiation de la transcription des gènes cibles.

b) **Le domaine de liaison à l'ADN (DBD):** Domaine central (région C), il est caractérisé par deux structures en doigts de zinc qui lui permettent de reconnaître et de se fixer spécifiquement aux séquences ARE (Androgen Response Elements) situées dans les régions promotrices des gènes cibles.

c) **La région charnière (Hinge region):** Domaine flexible (région D), situé entre le DBD et le LBD. Il joue un rôle charnière en permettant les changements conformationnels du récepteur et en facilitant la translocation du complexe AR-ligand vers le noyau de la cellule cible, grâce à la présence d'un signal de localisation nucléaire (NLS).

d) **Le domaine de liaison au ligand (LBD):** Situé à l'extrémité C-terminale (régions E/F), il assure la fixation des androgènes. Il contient également la fonction d'activation AF-2, qui, une fois le ligand lié, recrute des co-activateurs et déclenche la cascade transcriptionnelle.

Ces quatre domaines agissent de façon coordonnée: la liaison d'un androgène au LBD provoque un changement de conformation qui libère le récepteur de ses protéines chaperons, déclenche sa dimérisation, sa translocation nucléaire, puis sa fixation à l'ADN via le DBD aboutissant à l'activation ou à la répression de gènes cibles.(Figure 11)

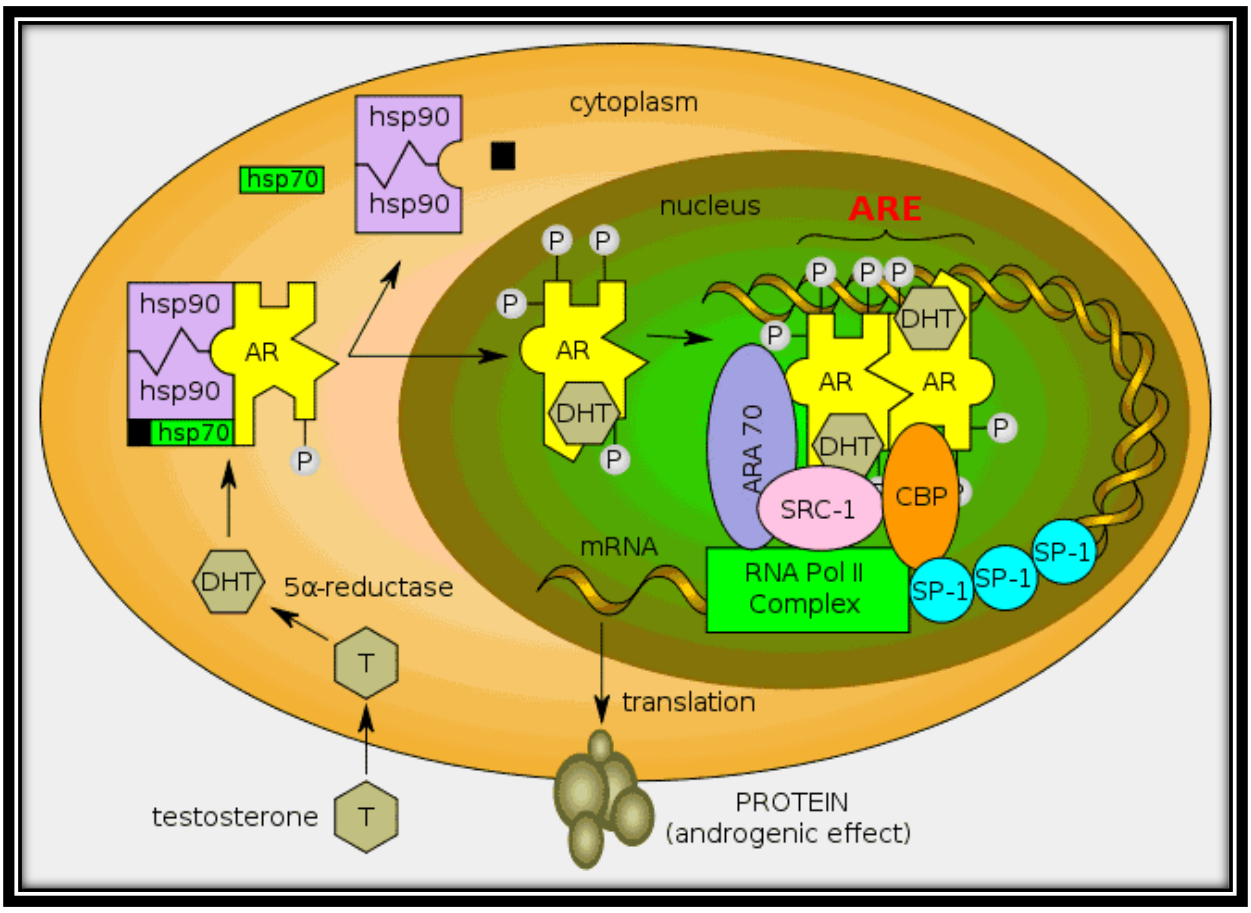


Figure 11: Mécanisme d'action génomique des androgènes via le récepteur aux androgènes **(Fariel REKIK2021)**

2-1-3-Translocation nucléaire et liaison à l'ADN

Ce complexe actif migre ensuite vers le noyau cellulaire. À ce niveau, il se fixe sur des séquences spécifiques de l'ADN appelées **éléments de réponse aux androgènes (ARE: Androgène Réponse Eléments)**. Cette fixation permet de recruter d'autres protéines régulatrices appelées co-activateurs transcriptionnels. L'ensemble de ces interactions déclenche ou augmente la transcription de gènes cibles.(Figure 12)

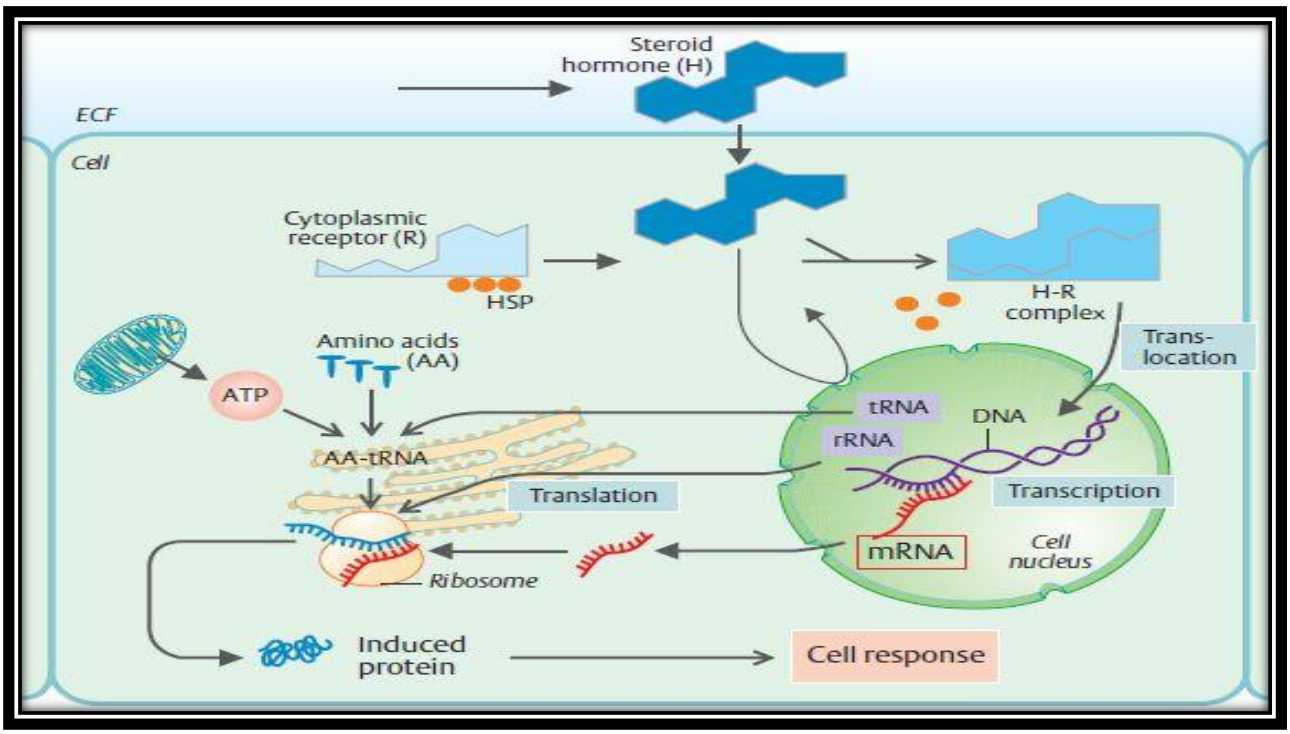


Figure 12: Mécanisme d'action des hormones stéroïdes: régulation de la transcription et synthèse des protéines **(Shrestha, S. (2011)**.

2-1-4-Activation des gènes cibles: la synthèse des protéines contractiles:

Les gènes activés sont principalement impliqués dans:

2-1-4-1-La synthèse des protéines contractiles (actine, myosine):

Les stéroïdes anabolisants stimulent l'expression des gènes qui codent pour les protéines contractiles principales du muscle, surtout l'actine et la myosine. Ces deux protéines sont responsables de la contraction musculaire. Elles forment les myofibrilles à l'intérieur des fibres musculaires. Quand le récepteur androgénique active ces gènes, la cellule augmente la production d'ARN messager correspondant, ce qui conduit à une augmentation de la traduction et donc de la synthèse protéique.(Figure 13)

Le résultat est l'accumulation de protéines contractiles dans la fibre musculaire qui provoque l'augmentation du volume des fibres hypertrophie musculaire. Autrement dit, le muscle devient plus gros parce qu'il contient plus de matériel contractile. **(Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. 14th ed. Elsevier; 2021.)**

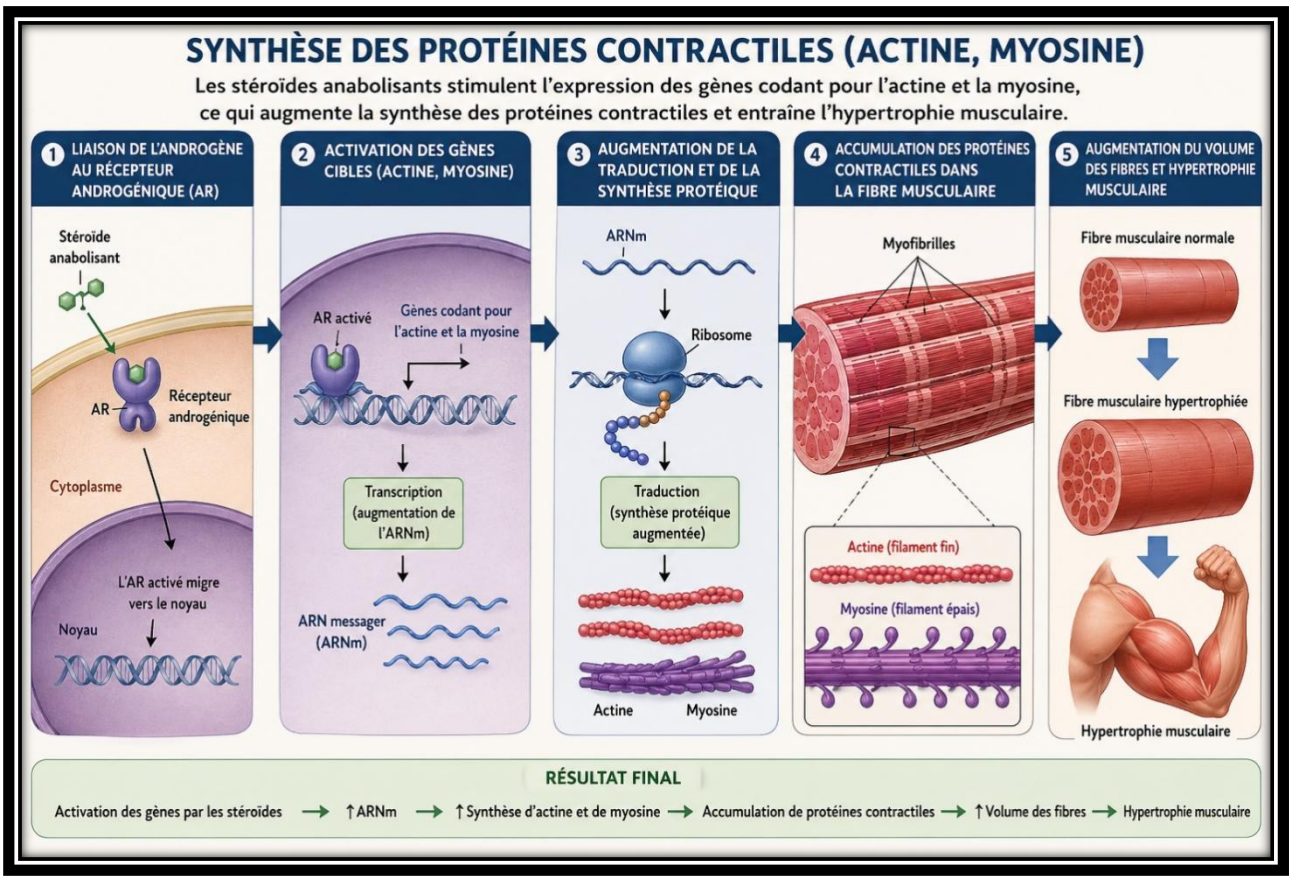


Figure13: Mécanisme de la synthèse des protéines contractiles (actine et myosine) induite par les stéroïdes anabolisants dans le muscle squelettique **(Site 7)**

2-1-4-2-La prolifération des cellules satellites:

Les cellules satellites sont des cellules souches musculaires situées autour des fibres musculaires. Elles jouent un rôle très important dans la réparation et la croissance musculaire. Sous l'effet des androgènes, l'expression de gènes impliqués dans la prolifération et la différenciation cellulaire augmente. Les cellules satellites s'activent, se multiplient puis fusionnent avec les fibres musculaires existantes (Figure 14). Cette fusion apporte de nouveaux noyaux à la fibre musculaire. Plus une fibre contient de noyaux, plus elle peut produire de protéines. C'est un mécanisme clé qui explique pourquoi les stéroïdes peuvent entraîner une augmentation importante et parfois durable de la masse musculaire **(Latchman, D.S. 1997).**

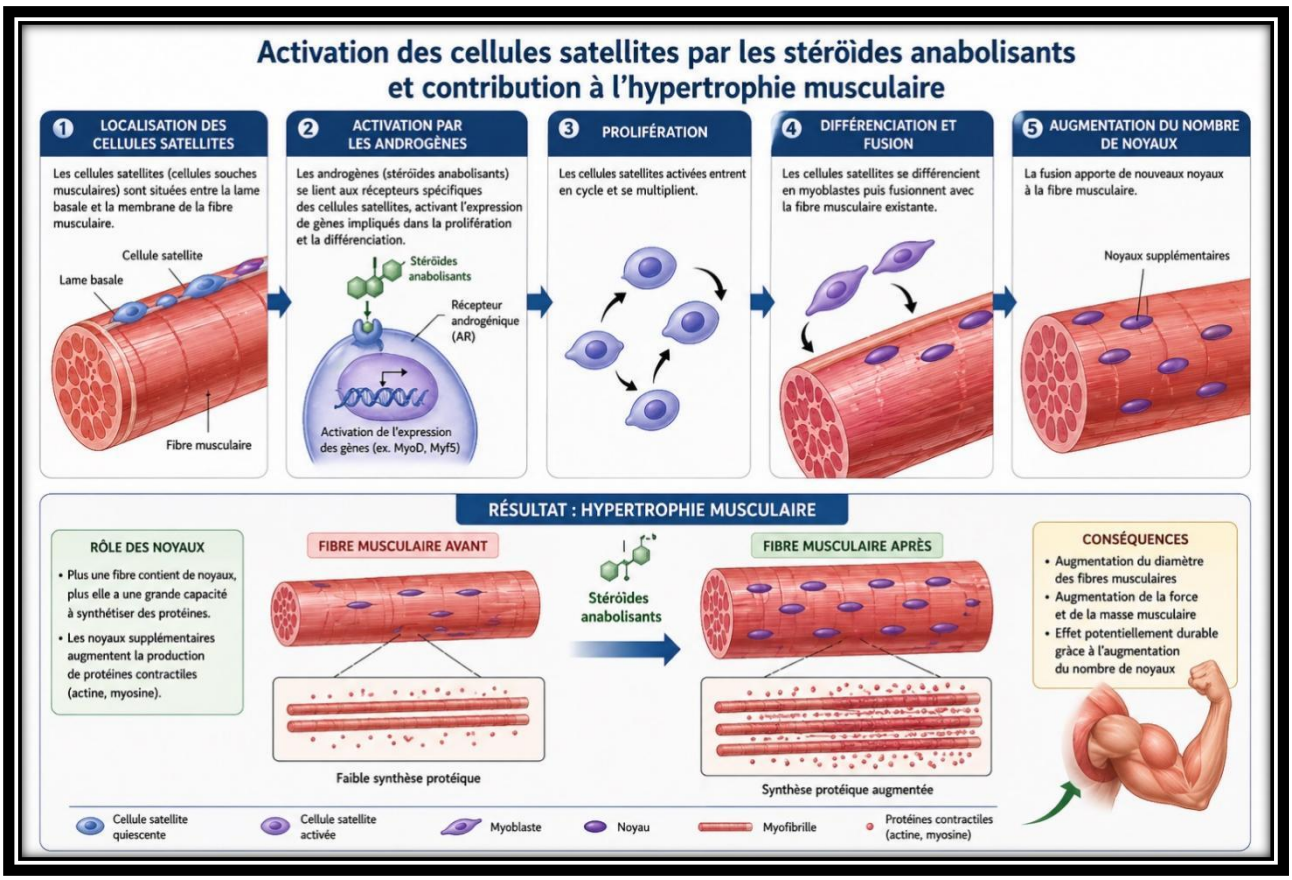


Figure 14: Mécanisme de La prolifération des cellules satellites **(Chargé, S. B. (2004).**

2-1-4-3-La régulation du métabolisme musculaire:

Les hormones anabolisantes influencent aussi les gènes impliqués dans le métabolisme énergétique du muscle. Elles peuvent:

- Augmenter l'utilisation des acides aminés pour la synthèse protéique

- Améliorer la rétention d'azote

- Modifier l'expression d'enzymes impliquées dans la glycolyse et le métabolisme mitochondrial

Cela rend le muscle plus efficace pour produire de l'énergie et pour utiliser les nutriments dans un objectif de croissance. Le muscle devient plus performant sur le plan métabolique, ce qui favorise la prise de masse. **(Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. 14th ed. Elsevier; 2021.)**

2-1-4-4-La diminution de la dégradation protéique:

La masse musculaire dépend d'un équilibre entre synthèse protéique et dégradation protéique. Les stéroïdes ne stimulent pas seulement la synthèse ; ils réduisent aussi la dégradation des

protéines musculaires. Ils modulent l'expression de gènes impliqués dans les voies cataboliques, notamment la voie ubiquitine-protéasome. En diminuant l'activité de ces voies, la destruction des protéines musculaires ralentit. Cela crée un bilan protéique positif (plus de synthèse que de destruction), ce qui favorise l'augmentation de la masse musculaire (**Davey & Grossmann 2016**).

Ainsi, l'effet des stéroïdes ne se limite pas à une simple stimulation hormonale temporaire. Il s'agit d'une modification réelle de l'activité transcriptionnelle de la cellule musculaire (Figure 15). Cela explique pourquoi l'augmentation de la masse musculaire peut être importante et parfois durable. Cependant, cette interaction directe avec l'ADN peut aussi avoir des effets non contrôlés si la stimulation est excessive ou prolongée. Une activation continue des récepteurs nucléaires peut perturber l'équilibre normal de l'expression génique et favoriser des anomalies cellulaires. **(Latchman, D.S. (1997), Özturan, Morova & Lack (2022)).**

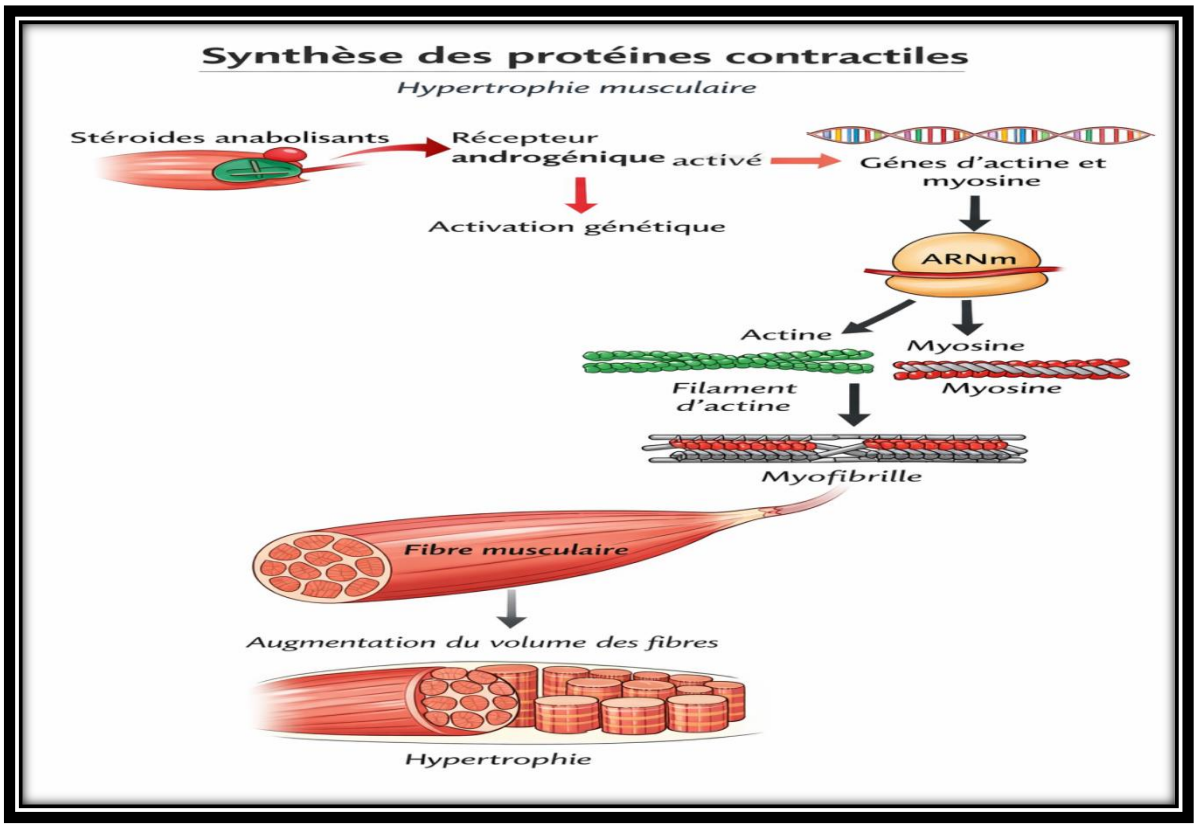


Figure 15: Activation du récepteur androgénique et synthèse des protéines contractiles **(Kicman, A. T. (2008).**

2-2- Modifications de l'expression des gènes:

Les hormones anabolisantes (testostérone et stéroïdes synthétiques) exercent une influence profonde sur l'expression génique, bien au-delà de leur simple effet visible sur la masse musculaire.

En tant que molécules lipophiles, elles franchissent librement la membrane des cellules musculaires pour se lier aux récepteurs androgènes. Ce faisant, elles déclenchent l'activation de la transcription de nombreux ARNm sans modifier la séquence de l'ADN elle-même: il ne s'agit pas d'une mutation, mais d'une reprogrammation épigénétique fine de l'expression des gènes (**Magnolini, R., Falcato, L., *et al.* 2022**).

Parmi les gènes concernés, certains jouent un rôle central dans la croissance musculaire — comme **IGF-1**, qui stimule l'hypertrophie des fibres, ou **MyoD**, qui favorise la prolifération des cellules satellites. Simultanément, ces hormones freinent la dégradation des protéines en inhibant la voie ubiquitine-protéasome, préservant ainsi le capital protéique de la cellule (Figure 16).

Le résultat est une hypertrophie musculaire rapide et marquée. Celle-ci est partiellement réversible à l'arrêt du traitement — mais il serait inexact d'y voir un effet sans lendemain: des modifications durables de la régulation génique peuvent persister, témoignant d'une empreinte biologique qui s'étend bien au-delà de la période d'utilisation (**Glass, D.J., 2005**).

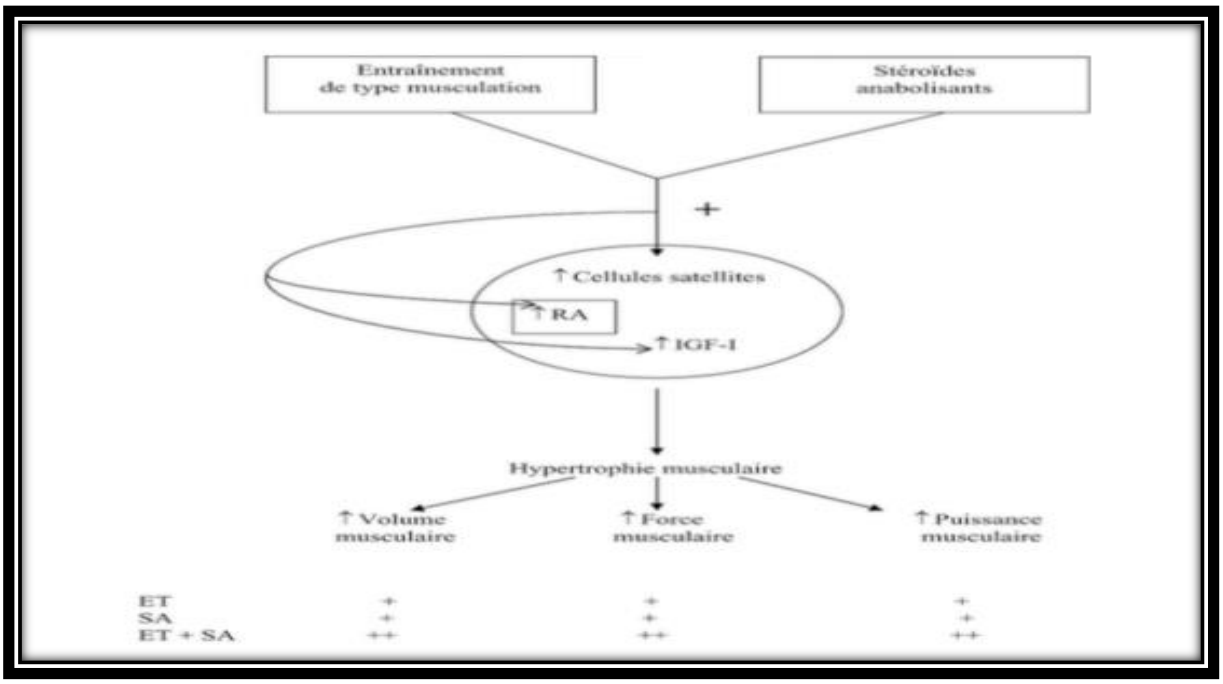


Figure 16. Mécanismes d'action et effets sur le muscle d'un entraînement de type musculation (ET) et/ou du dopage aux stéroïdes anabolisants **(Emeric Roger 2024)**

2-2-1-Gènes liés à l'hypertrophie musculaire:

Les stéroïdes anabolisants ne se contentent pas de faire grossir les muscles, ils reprogramment en profondeur la manière dont les cellules musculaires lisent et utilisent leurs gènes. Leur action repose sur l'activation de voies moléculaires sophistiquées qui installent durablement la cellule dans un état favorable à la construction et à la croissance (**Magnolini, R., Falcato, L., *et al.* 2022**).

Au cœur de ce processus se trouve la cascade **IGF-1 / Akt / mTOR**, l'une des voies de signalisation les plus puissantes dans la régulation de l'hypertrophie musculaire. La stimulation de cette voie entraîne:

- Une augmentation de la synthèse des protéines musculaires
- Une activation des facteurs de transcription anaboliques
- Une réduction des signaux cataboliques

Sous l'effet des androgènes, l'expression du **gène IGF-1 (**le facteur de croissance analogue à l'insuline) (Figure 17) est amplifiée dans les tissus musculaires. Cette molécule agit comme un signal de départ: elle stimule la prolifération et la différenciation cellulaire, tout en relançant la machinerie de synthèse des protéines.

Elle active ensuite **la protéine Akt**, qui transmet le message à mTOR, véritable chef d'orchestre de la traduction protéique.

Une fois **mTOR activée**, la cellule accélère la production de protéines contractiles à partir de ses ARNm. Mais l'effet ne s'arrête pas là: cette même voie freine simultanément les mécanismes de dégradation des protéines, inclinant la balance cellulaire en faveur de la construction. Le résultat est une accumulation nette de matière protéique dans la fibre musculaire ce qui se traduit concrètement par son épaississement (**Magnolini, R., Falcato, L., *et al.* 2022**).

Les stéroïdes anabolisants agissent également sur les cellules satellites, ces cellules souches musculaires qui entrent en jeu lors de la réparation et de la croissance du tissu. En modifiant l'expression des gènes qui gouvernent leur activation et leur différenciation, les androgènes décuplent la capacité du muscle à se régénérer après un effort intense ou une lésion. Mieux encore, ces cellules fusionnent avec les fibres existantes pour leur apporter de nouveaux noyaux, offrant ainsi à la cellule musculaire une capacité de croissance élargie.

Les stéroïdes anabolisants orchestrent un rééquilibrage moléculaire global: ils amplifient l'expression des gènes favorables à la construction tout en musclant les freins sur les voies cataboliques. C'est ce double mécanisme qui explique l'augmentation du diamètre des fibres musculaires, phénomène connu sous le nom d'hypertrophie musculaire**. (B B Bodine, et al. 2001).**

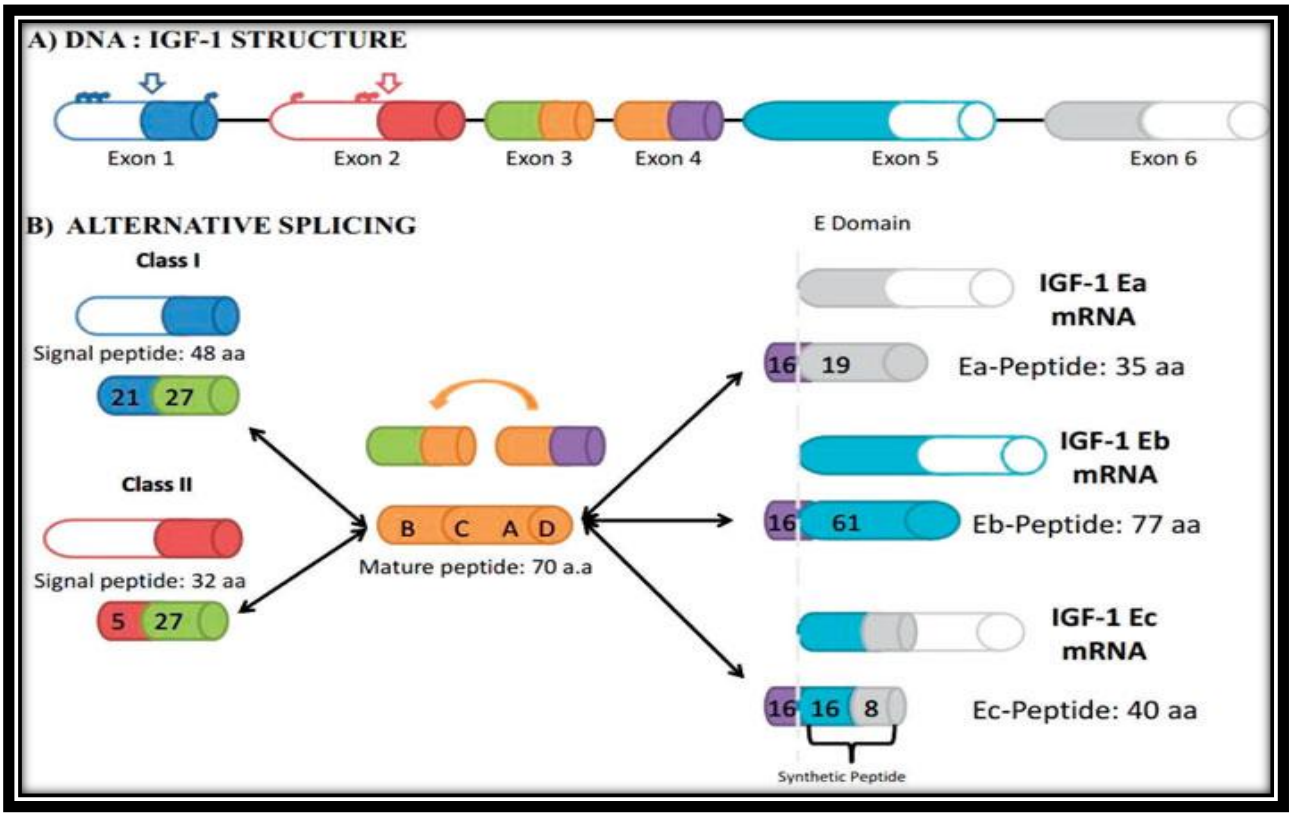


Figure17: Le gène IGF-1 **(Koundourakis, N. E., et al. (2014).**

2-2-2- Gènes liés à la croissance cellulaire:

Les hormones anabolisantes influencent également des gènes impliqués dans le cycle cellulaire et la prolifération. Elles peuvent augmenter l'expression de gènes qui contrôlent:

- La progression du cycle cellulaire (phase G1/ S)
- La réplication de l'ADN
- La division cellulaire

Cette stimulation peut être bénéfique dans un contexte de réparation musculaire, car elle permet une régénération plus rapide des tissus. Cependant, une activation excessive et prolongée peut déséquilibrer les mécanismes normaux de contrôle cellulaire. Si les systèmes

de régulation (comme les gènes suppresseurs de tumeurs) sont perturbés, cela peut favoriser une prolifération anormale.

C'est pour cette raison que l'usage chronique et à forte dose des stéroïdes est parfois associé à un risque accru de certaines pathologies, notamment au niveau hépatique ou prostatique **(Bhasin, S. et al. (2001).**

Les hormones anabolisantes ne se limitent pas au muscle lui-même, elles touchent aussi les mécanismes fondamentaux qui régissent la vie et la division des cellules.(Figure18)

En agissant sur les gènes du cycle cellulaire, elles peuvent accélérer plusieurs étapes clés: la progression de la phase G1 vers la phase S, la réplication de l'ADN, et la division cellulaire elle-même. Dans un contexte de récupération après l'effort, cette stimulation peut sembler bénéfique le tissu musculaire se régénère plus vite, les lésions se réparent plus efficacement.

Mais cette même capacité porte en elle un revers. Lorsque l'exposition aux stéroïdes est prolongée et à doses élevées, la stimulation répétée de ces voies peut déborder les garde-fous naturels de l'organisme. Les gènes suppresseurs de tumeurs dont le rôle est précisément de surveiller et de corriger toute dérive cellulaire peuvent être progressivement déstabilisés. La cellule perd alors en partie sa capacité à s'autoréguler, ouvrant la voie à une prolifération anormale.

Ce n'est pas un risque théorique: c'est l'une des raisons pour lesquelles l'usage chronique de stéroïdes anabolisants à fortes doses est associé à une incidence accrue de certaines pathologies, en particulier au niveau hépatique avec des lésions pouvant évoluer vers des tumeurs et prostatique, où les androgènes jouent un rôle connu dans la progression tumorale **(Bhasin, S. et al., 2001).**

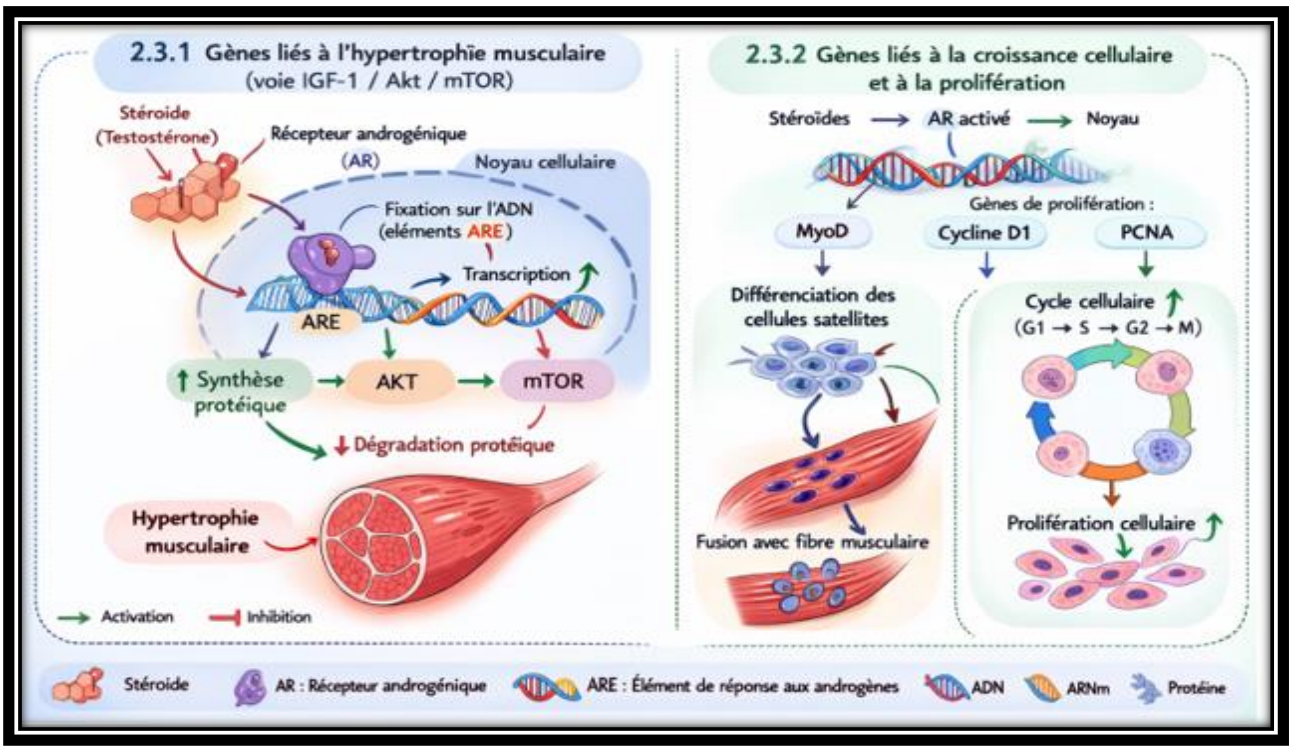


Figure 18: Modifications de l'expression des gènes par les stéroïdes anabolisants **(Site 8)**

2-3- Risques génétiques:

2-3-1- Mutations:

À la base de tout risque génétique se trouve la mutation une modification permanente inscrite dans la séquence même de l'ADN. Elle peut prendre plusieurs formes: le remplacement d'une seule base nucléotidique, l'insertion ou la délétion d'un fragment entier. Ces altérations, même ponctuelles, peuvent suffire à dérégler des gènes essentiels.

Or, les hormones anabolisantes créent dans la cellule un environnement propice à ces dommages. En induisant un stress oxydatif c'est-à-dire une surproduction de radicaux libres, elles fragilisent l'ADN de l'intérieur. Des études ont mis en évidence, dans les cellules musculaires et hépatiques exposées aux stéroïdes, des cassures de l'ADN et des altérations de gènes impliqués dans le contrôle de la division cellulaire.

Plus préoccupant encore: ces mutations ne se limitent pas toujours aux cellules du corps. Lorsqu'elles touchent les cellules germinales, elles deviennent transmissibles ouvrant la possibilité que certains effets se répercutent sur les générations suivantes. Les mutations constituent ainsi un premier niveau de risque, qui peut préparer le terrain à des anomalies plus graves en cas d'exposition prolongée **(Bond, Smit et de Ronde (2022)).**

2-3-2- Instabilité génomique:

L'instabilité génomique désigne la fragilité et l'altération de la structure de l'ADN et des chromosomes. Cela inclut:

- Les cassures chromosomiques
- Les duplications ou pertes de segments d'ADN
- Les erreurs de réparation après des dommages à l'ADN

L'utilisation prolongée d'hormones anabolisantes peut altérer les mécanismes naturels de réparation de l'ADN, ce qui fait que les cellules ne corrigent plus correctement les erreurs. À long terme, ces anomalies s'accumulent, rendant le génome instable.

Cette instabilité est dangereuse car elle favorise l'apparition de cellules anormales capables de proliférer de manière incontrôlée. Des études ont observé chez des utilisateurs réguliers de stéroïdes des anomalies chromosomiques, qui peuvent être un précurseur du cancer ou d'autres maladies génétiques **(Aguilera et García-Muse (2013)).**

2-3-3- Risque de cancer:

Le risque de cancer est une conséquence directe des mutations et de l'instabilité génomique. Les mutations répétées et la fragilité du génome peuvent transformer des cellules normales en cellules tumorales. Chez les utilisateurs d'hormones anabolisantes, les organes les plus touchés sont:

- Le foie: apparition possible de carcinomes hépatiques
- La prostate: croissance anormale des cellules prostatiques pouvant mener à des tumeurs
- Les testicules: perturbation de la production normale de sperme et cellules germinales à risque

Même si le cancer n'apparaît pas chez tous les utilisateurs, l'exposition prolongée aux stéroïdes augmente significativement la probabilité que des cellules anormales se développent en tumeurs. Les mécanismes impliqués sont liés à l'accumulation des mutations et à l'incapacité des cellules à réparer correctement leur ADN **(Martinez et al., 2019).**

Chapitre 3:

Les stéroïdes anabolisants légaux et les produits du marché noir

L'usage des stéroïdes anabolisants androgéniques dépasse aujourd'hui le seul cadre sportif pour devenir une véritable problématique médicale et sanitaire. Ces substances, reconnues pour leurs effets sur la masse musculaire, la force et la récupération, s'inscrivent dans deux réalités opposées: un usage médical légal et encadré, et un usage illicite alimenté par le marché noir.

Cette distinction est fondamentale, car le niveau de risque varie radicalement selon le contexte. Les stéroïdes pharmaceutiques sont produits sous des normes strictes de qualité et de pureté, et leur utilisation s'accompagne d'un suivi médical permettant de contrôler les effets et d'ajuster les doses. À l'inverse, les produits clandestins échappent à toute réglementation: composition incertaine, dosage imprévisible et conditions de fabrication douteuses exposent l'utilisateur à des contaminants chimiques ou microbiologiques insoupçonnés (**Ilieve et al. 2026)**.

Le danger des stéroïdes du marché noir ne réside donc pas uniquement dans leur nature hormonale, mais surtout dans leur opacité totale et l'absence de tout encadrement médical, augmentant drastiquement les risques de complications cardiovasculaires, hépatiques, endocriniennes, psychologiques et musculo-squelettiques.

Il est nécessaire de faire une analyse sur les différences entre stéroïdes légaux et clandestins, explorer les risques spécifiques des produits illicites, et mettre en lumière l'importance de la prévention et du suivi médical dans la réduction de ces risques.

3-1- Différences entre stéroïdes anabolisants légaux et produits du marché noir

Les stéroïdes anabolisants androgéniques (SAA) peuvent se présenter sous deux formes principales:

- **Les stéroïdes pharmaceutiques légaux**, produits dans des laboratoires certifiés.
- **Les stéroïdes issus du marché noir**, fabriqués de manière clandestine et vendus sans contrôle réglementaire.

Bien que les deux types puissent avoir des effets similaires sur la masse musculaire et la force, leurs différences en termes de qualité, de sécurité et de prévisibilité sont significatives.

3-1-1- Stéroïdes pharmaceutiques légaux:

ont soumis à des normes strictes de production et de contrôle qualité. Chaque lot est testé pour vérifier sa pureté, sa concentration et l'absence de contaminants. Ces produits contiennent des doses précisément définies, ce qui permet aux médecins de suivre leur administration et d'adapter les prescriptions selon les besoins spécifiques du patient.

Dans le cadre médical, les SAA peuvent être prescrits pour traiter:

- Les déficits hormonaux masculins (hypogonadisme).
- Les pertes musculaires sévères liées à des maladies chroniques ou à une cachexie.
- Certaines maladies endocriniennes ou génétiques affectant la croissance musculaire.

Le suivi médical permet également de limiter les effets secondaires: des analyses sanguines régulières, le contrôle de la fonction hépatique, cardiaque et hormonale, ainsi que des examens cardiovasculaires, réduisent les risques liés à l'utilisation de ces hormones. Cependant, même dans un cadre médical, ces substances ne sont pas dépourvues de dangers. Une utilisation prolongée ou au-delà des doses recommandées peut entraîner des troubles cardiovasculaires, hépatiques, endocriniens ou psychologiques, ainsi qu'un stress oxydatif accru au niveau cellulaire (**Basaria, 2010 ; Kanayama et al., 2022**).

3-1-2- Stéroïdes du marché noir:

Les produits vendus sur le marché noir sont très différents. Ils sont souvent fabriqués dans des conditions non contrôlées, sans respect des normes d'hygiène ou de dosage. Les risques associés sont multiples:

3-1-2-1-Composition inconnue ou variable:

-Le produit peut contenir des substances autres que celles indiquées sur l'étiquette.

-Les doses réelles peuvent être très supérieures ou inférieures à celles annoncées, ce qui augmente l'imprévisibilité des effets physiologiques (**Magnolini, R., *et al.* 2022**.)

3-1-2-2-Contaminations et impuretés:

-Métaux lourds, solvants, bactéries ou autres agents toxiques peuvent être présents.

-L'injection avec du matériel non stérile accroît le risque d'infections locales ou systémiques, telles que l'endocardite ou l'hépatite virale. (**Pope et al., 2020**).

3-1-2-3-Effets secondaires plus intenses et imprévisibles:

- Les SAA du marché noir peuvent provoquer rapidement des déséquilibres hormonaux sévères, une hypertension, une dyslipidémie, une hépatotoxicité et des troubles psychiques (agressivité, dépression, addiction).
- Les effets musculo-squelettiques (ruptures tendineuses, douleurs articulaires) peuvent être amplifiés par des doses supérieures aux seuils physiologiques **(Magnolini, R., Falcato, L., et al. 2022).**

3-1-2-4-Absence de suivi medical:

- Les utilisateurs de stéroïdes clandestins se basent souvent sur des informations non scientifiques ou des conseils de pairs, sans consultation médicale.
- Cette absence de surveillance rend les complications plus fréquentes et parfois irréversibles.
- Le risque d'interactions médicamenteuses ou de complications cardiovasculaires est également plus élevé, surtout si le sportif combine plusieurs substances dopantes. (**Yesalis & Bahrke, 2022**)

3-1-3 Conséquences à long terme:

L'utilisation de stéroïdes issus du marché noir entraîne souvent des conséquences plus sévères sur la santé à long terme:

- **Cardiovasculaires**: augmentation du risque d'infarctus, d'arythmies et d'hypertension.
- **Hépatiques**: hépatotoxicité, cholestase, formation de tumeurs bénignes ou malignes.
- **Endocriniennes**: suppression de la production naturelle de testostérone, infertilité, atrophie testiculaire.
- **Psychologiques**: troubles de l'humeur, agressivité, dépendance, anxiété ou dépression.
- **Musculo-squelettiques**: rupture tendineuse, tendinopathies chroniques, altération de la régénération musculaire et tendineuse.

Même si les stéroïdes pharmaceutiques comportent déjà des risques, l'usage de produits du marché noir multiplie ces dangers, en raison de la qualité incertaine, des doses imprévisibles et de l'absence de suivi médical (Figure 19). La prévention et l'éducation restent les

principaux leviers pour réduire les risques associés à l'usage de SAA (**Magnolini, R., et al. 2022**).

CRITÈRES	STÉROÏDES PHARMACEUTIQUES	STÉROÏDES DU MARCHÉ NOIR
Origine	Produits par des laboratoires pharmaceutiques autorisés.	Produits illégalement, souvent dans des conditions inconnues.
Contrôle de qualité	Contrôle strict et respect des normes sanitaires.	Aucun contrôle fiable, qualité incertaine.
Composition	Composition précise et connue avec exactitude.	Composition incertaine, parfois falsifiée ou différente de l'étiquette.
Dosage	Dosage exact et standardisé.	Dosage variable, peut être surdosé ou sous-dosé.
Utilisation médicale	Prescrits par un médecin dans certains cas médicaux (troubles hormonaux, perte de masse musculaire).	Utilisation non médicale et non encadrée.
Suivi médical	Suivi médical possible et recommandé.	Aucun suivi médical, utilisation à risque.
Risques d'infection	Très faibles grâce à des conditions de production stériles.	Élevés, risque de contamination, impuretés et mauvaises conditions d'hygiène.
Effets secondaires	Effets indésirables mieux contrôlés et surveillés.	Effets imprévisibles, souvent plus intenses et plus graves.
Sécurité globale	Relativement plus sûre si utilisée correctement et sous supervision médicale.	Très risquée pour la santé à cause du manque de contrôle, de la mauvaise qualité et de l'absence de surveillance médicale.

Figure 19: Différences entre les stéroïdes anabolisants légaux et les produits issus du marché noir **(Site 9)**

3-2- L'effet négative des stéroïdes anabolisantes illégale:

3-2-1- Effets sur les muscles et le système musculo-squelettique:

Les stéroïdes anabolisants sont connus pour accélérer spectaculairement le développement musculaire et la force physique, parfois en l'espace de quelques semaines. À première vue, cela peut sembler être un avantage considérable pour les sportifs, en particulier dans les disciplines de force comme la musculation. Pourtant, cette progression fulgurante cache une réalité bien plus préoccupante: le corps ne se transforme pas de manière uniforme (**Żywiec, W., et al. 2025**).

En effet, si les muscles répondent rapidement aux stéroïdes en gonflant et en gagnant en puissance, les tendons et les ligaments, eux, n'évoluent pas au même rythme. Ces structures conjonctives ont un métabolisme plus lent et un renouvellement cellulaire beaucoup plus

progressif, ce qui les empêche de se renforcer aussi vite que les fibres musculaires. On se retrouve alors face à un déséquilibre dangereux: une masse musculaire accrue qui génère des forces contractiles que les tendons, dont la résistance n'a pas progressé en parallèle, peinent à absorber **(Albright, J. A., et al. 2023).**

Ce déséquilibre fragilise l'ensemble de l'appareil locomoteur et augmente significativement le risque de blessures graves. Des études ont montré que la rupture tendineuse chez les utilisateurs de stéroïdes anabolisants était jusqu'à neuf fois plus probable que chez les non-utilisateurs. Les ruptures tendineuses, notamment au niveau du biceps ou du tendon d'Achille, figurent parmi les lésions les plus fréquemment observées, souvent déclenchées par un effort mal dosé ou un mouvement brusque. Des travaux récents soulignent que l'augmentation de la rigidité et la diminution de l'élasticité tendineuse observées dès une exposition à court terme aux stéroïdes anabolisants contribuent directement à ce risque accru de blessure lors de l'activité physique. Les articulations les plus sollicitées, comme le genou ou l'épaule, deviennent-elles aussi plus vulnérables aux entorses et aux instabilités chroniques. À cela s'ajoutent des douleurs musculaires et articulaires persistantes, qui peuvent s'installer durablement sous l'effet des contraintes répétées imposées à des tissus fragilisés (**Basaria, 2010**).

Un autre mécanisme aggravant mérite d'être souligné: les stéroïdes anabolisants perturbent la synthèse et la réticulation du collagène, composant structural principal des tendons, entraînant des réponses inadaptées de ces derniers, notamment une réduction de leur élasticité. L'exposition aux stéroïdes anabolisants, en particulier associée à l'exercice physique, conduit à une dysplasie du collagène qui rend les tendons plus rigides, moins flexibles, et donc plus susceptibles de céder sous contrainte. Lorsque cette synthèse est perturbée, les tendons perdent en souplesse et, paradoxalement, deviennent plus susceptibles de se rompre sous l'effet d'une contrainte mécanique (**Żywiec et al., 2025 ; Basaria, 2010**).

3-2-2- Effets dermatologiques et physiques:

La consommation de stéroïdes anabolisants entraîne de nombreuses modifications visibles sur la peau et l'apparence générale. Ces effets découlent principalement d'une élévation des hormones androgènes dans l'organisme, qui vient perturber le fonctionnement normal de la peau, des glandes sébacées et des follicules pileux (**Handelsman et al., 2018 ; Kanayama et al., 2018**).

L'un des signes les plus caractéristiques et des plus précoces est l'apparition d'une acné, parfois sévère, touchant en priorité le visage, le dos et les épaules. Ce phénomène résulte

d'une hypersécrétion de sébum qui obstrue les pores et favorise l'installation d'infections cutanées. Dans les formes les plus intenses, l'acné prend un caractère inflammatoire et peut laisser des cicatrices indélébiles lorsqu'elle n'est pas prise en charge à temps (**Korkusuz et al., 2020 ; Mihan et al., 2021**).

Une chute de cheveux précoce, connue sous le nom d'alopécie androgénétique, est également fréquemment observée, en particulier chez les individus génétiquement prédisposés. Les stéroïdes accélèrent ce processus en agissant directement sur les follicules pileux, provoquant un recul progressif de la ligne frontale ou un éclaircissement marqué au niveau du sommet du crâne (**Shapiro & Kaufman, 2017 ; Rossi et al., 2022**).

Les vergetures constituent un autre effet cutané courant, particulièrement chez ceux dont la masse musculaire augmente très rapidement. Face à cette expansion brutale du volume corporel, la peau n'a tout simplement pas le temps de s'adapter: les fibres cutanées se déchirent, laissant apparaître des stries souvent profondes au niveau des épaules, des bras, de la poitrine ou des cuisses. Dans la grande majorité des cas, ces marques persistent durablement, même après l'arrêt de la prise de stéroïdes (**Elsaie & Keloids, 2019 ; Öztürk et al., 2020**).

De façon plus générale, la peau tend à devenir plus grasse et plus réactive, avec des épisodes répétés de rougeurs ou de petites inflammations. Certains utilisateurs rapportent également une cicatrisation ralentie et des problèmes cutanés récurrents qui s'installent dans la durée (**Svensson et al., 2019 ; Llewellyn et al., 2020).**

Chez la femme, ces effets prennent une dimension particulièrement préoccupante, car l'organisme féminin est bien plus sensible à un excès d'androgènes. On parle alors de virilisation: apparition d'une pilosité plus abondante et plus épaisse sur le visage, le torse ou le dos, et modification progressive de la voix qui devient plus grave. Ce dernier changement est souvent irréversible, y compris après l'arrêt total des stéroïdes (**Hartgens & Kuipers, 2019 ; Kanayama et al., 2018).**

À cela peuvent s'ajouter une hypertrophie du clitoris et des perturbations du cycle menstruel allant de simples irrégularités jusqu'à une aménorrhée complète, traduisant un dérèglement hormonal profond (**Evans-Brown et al., 2020 ; Lestingi et al., 2021**).

Au-delà des manifestations physiques, ces transformations corporelles peuvent également avoir des répercussions sur le plan psychologique. Voir son corps se modifier de façon inattendue ou incontrôlée peut engendrer un sentiment de malaise (Figure 20), une perte de

confiance en soi et une gêne dans les interactions sociales. Dans les situations les plus difficiles, cela peut évoluer vers une détresse psychologique réelle ou une insatisfaction corporelle profonde, d'autant plus lorsque les signes deviennent visibles et difficiles à dissimuler (**Pope & Wood, 2014 ; Kanayama et al., 2019).**



Figure 20: Effets dermatologiques et physiques des stéroïdes fabriqués au marché noir**.**
(Mahmoud Aissa/Ahmed Bilal)

3-2-3 -Effets génétiques et cellulaires

Les stéroïdes anabolisants androgéniques (SAA) ne se limitent pas à agir sur la masse musculaire ou l'apparence physique: leurs effets s'exercent en réalité bien plus profondément, au cœur même des cellules et de leur patrimoine génétique. Leur mode d'action repose essentiellement sur leur capacité à activer ou à inhiber certains gènes en interagissant directement avec l'ADN.

Du fait de leur nature lipophile, les SAA franchissent sans difficulté les membranes cellulaires et viennent se fixer sur des récepteurs androgéniques spécifiques. Le complexe ainsi formé migre alors vers le noyau de la cellule, où il module l'expression génique de manière directe. Cette modulation stimule la transcription des gènes responsables de la synthèse des protéines contractiles et structurelles, favorisant ainsi l'hypertrophie musculaire et le gain de force (**Nieschlag & Vorona, 2022).**

Toutefois, une exposition prolongée ou à doses élevées à ces hormones de synthèse finit par rompre l'équilibre cellulaire. L'un des effets les plus régulièrement observés est l'augmentation du stress oxydatif, autrement dit une surproduction de radicaux libres susceptibles d'endommager les membranes cellulaires, les protéines et l'ADN lui-même. Lorsque ces altérations génétiques ne sont pas correctement réparées par les mécanismes naturels de l'organisme, elles peuvent conduire à des mutations et, à terme, accroître le risque de développer certains cancers ou des pathologies dégénératives **(Rossi et al., 2021).**

En parallèle, une exposition soutenue aux SAA peut engendrer un dysfonctionnement cellulaire plus diffus et progressif. Certaines cellules perdent peu à peu leur capacité à se régénérer efficacement, ce qui accélère le vieillissement des tissus, compromet les mécanismes de réparation et altère durablement le fonctionnement de plusieurs organes. Ces effets à long terme sont notamment liés à une perturbation du métabolisme mitochondrial et à l'entretien d'un état inflammatoire chronique (**Bhasin et al., 2023**).

Ces mécanismes permettent de mieux comprendre pourquoi, malgré les gains musculaires initiaux qu'ils procurent, l'usage prolongé de SAA expose à des risques sérieux pour la santé cellulaire et génétique des risques qui, pour beaucoup, ne se manifestent qu'avec le temps, mais dont les conséquences peuvent s'avérer irréversibles.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les hormones anabolisantes regroupent un ensemble hétérogène de substances: stéroïdes androgéniques, hormones peptidiques (hormone de croissance, insuline), bêta-2 agonistes et inhibiteurs de la myostatine , qui partagent la capacité de stimuler la croissance musculaire, d'accroître la synthèse protéique et d'améliorer la récupération. Leur action repose sur des mécanismes moléculaires précis et sur des modifications chimiques visant à renforcer l'effet anabolisant tout en réduisant l'androgénicité.

Les agents présentent un intérêt thérapeutique pour des affections telles que l'hypogonadisme, la cachexie ou l'atrophie musculaire, mais leur emploi nécessite un encadrement médical strict en raison de risques cardio-hépatiques, endocriniens et psychologiques. Le détournement massif vers le sport a entraîné une diffusion sur le marché noir: produits contrefaits, dosages incertains et contaminations augmentent les dangers. Au niveau cellulaire, une exposition prolongée peut induire stress oxydatif, altérations épigénétiques, instabilité génomique et accroissement du risque de tumeurs.

Il est donc essentiel de renforcer la prévention, le contrôle sanitaire et la recherche sur les effets à long terme pour protéger la santé publique et l'intégrité du sport.

Enfin, il est important de sensibiliser les jeunes et les sportifs aux risques du dopage hormonal. Il faut aussi renforcer le contrôle des produits illégaux afin de réduire les dangers liés au marché noir.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. Aguilera, A., & García-Muse, T. (2013). Causes of genome instability. Annual Review of Genetics, 47, 1–32.
2. Albano, G. D., Amico, F., Cocimano, G., Liberto, A., Maglietta, F., Esposito, M., Rosi, G. L., Di Nunno, N., Salerno, M., & Montana, A. (2021). Adverse Effects of Anabolic-Androgenic Steroids: A Literature Review. Healthcare, 9(1), 97.
3. Albright, J. A., Lou, M., Rebello, E., et al. (2023). Testosterone replacement therapy is associated with increased odds of Achilles tendon injury and subsequent surgery. Journal of Foot and Ankle Research, 16, 76.
4. American Physiological Society Journal. (2021).
5. Andreassen, T. K. (2006). The Role of Plasma-binding Proteins in the Cellular Uptake of Lipophilic Vitamins and Steroids. Hormone and Metabolic Research, 38(4), 279–290.
6. Basaria, S. (2010). Androgen abuse in athletes: detection and consequences. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 95, 1533–1543.
7. Baumann G. (2003). The Growth Hormone Receptor and Signal Transduction. Endocrine Reviews.
8. Bernnan R et al,2023 Use of selective androgen receptor modulators in recreational athletes
9. Bhasin, S., Woodhouse, L., Casaburi, R., Singh, A. B., Mac, R. P., Lee, M., Yarasheski, K. E., Sinha-Hikim, I., Dzekov, C., Dzekov, J., Magliano, L., & Storer, T. W. (2001). Testosterone dose-response relationships in healthy young men. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism, 281(6), E1172–E1181.
10. BioTech USA. (2026). GH Hormone Regulator. Consulté en 2026.
11. Bodine, S. C., Stitt, T. N., Gonzalez, M., et al. (2001). Akt/mTOR pathway is a crucial regulator of skeletal muscle hypertrophy. Nature Cell Biology, 3(11), 1014–1019.
12. Bond, P., Smit, D. L., & de Ronde, W. (2022). Anabolic–androgenic steroids: How do they work and what are the risks? Frontiers in Endocrinology, 13, 1059473.
13. Canada. Ministère de la Défense nationale. (2016). Fiche d'information sur les stéroïdes anabolisants. (D2-519/2016E-PDF). National defence.
14. Cerin (2017). Symposium CERIN Protéines et activité physique et sportive: pourquoi, comment ? https://www.cerin.org/wp-content/uploads/2017/01/proteines-activite-physique-et-sportive-12-12-12.pdf
15. Cesbron, N. (2017). Les stéroïdes anabolisants et leurs effets. Paris: Éditions Médicales.

16. Chargé, S. B., & Rudnicki, M. A. (2004). Cellular and molecular regulation of muscle regeneration. Physiological Reviews.
17. Davey, R. A., & Grossmann, M. (2016). Androgen Receptor Structure, Function and Biology: From Bench to Bedside. Clinical Biochemist Reviews, 37(2), 3–15.
18. Dubois, V., et al. (2024). Androgens and skeletal muscle: cellular and molecular action mechanisms underlying the anabolic actions. PMC / NCBI Review.
19. Evans-Brown, M., Fischer, B., & Cunliffe, A. (2020). Patterns of steroid use and self-reported adverse effects in a community sample. Journal of Substance Use, 25(4), 345–352.
20. Food and Drug Administration (FDA). (2019). Risks of anabolic steroid abuse.
21. Franceschini, L. (2009). Effets secondaires des stéroïdes anabolisants. Revue Médicale Suisse, 5, 123–128.
22. Genesis Publication. (2021). Growth hormone and anabolic mechanisms. Genesis Pub.
23. Ghaibour, K., et al. (2023). Androgen receptor coordinates muscle metabolic and contractile functions. Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle, 14, 1707–1720.
24. Glass, D.J. (2005). Skeletal muscle hypertrophy and atrophy signaling pathways. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology, 37(10), 1974-1984.
25. Goldberg, L. (2012). Performance-enhancing substances in sports.
26. Graham, M. R., Davies, B., Grace, F. M., Kicman, A., & Baker, J. S. (2012). Anabolic steroid use: Patterns of use and detection of doping. Sports Medicine, 42(1), 15–30.
27. Handelsman, D. J., et al. (2018). Global position statement on testosterone replacement therapy. Endocrine Reviews, 39(2), 119–170.
28. Harrison, T. R. (2010). Harrison's Principles of Internal Medicine (18th ed.). McGraw-Hill.
29. Hartgens, F., & Kuipers, H. (2019). Effects of androgenic-anabolic steroids in women: a review. Sports Medicine, 49(8), 1235–1248.
30. Heinlein, C. A., & Chang, C. (2002). Androgen receptor in prostate cancer. Endocrine Reviews, 23(2), 175–200.
31. Ilieve et al. (2026). Anabolic–Androgenic Steroids Revisited: Structural Biology, Receptor Signaling, and Mechanisms of Anabolic–Androgenic Dissociation. International Journal of Molecular Sciences, 27(6), 2581.
32. Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2026). Complications cardiovasculaires associées à l'utilisation des stéroïdes anabolisants.
33. Kanayama, G., et al. (2019). Body image and anabolic steroid use: psychological consequences. Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research, 7, 1–7.

34. Kanayama, G., Hudson, J. I., & Pope, H. G. (2018). Long-term psychiatric and medical consequences of anabolic-androgenic steroid abuse: A looming public health concern? Drug and Alcohol Dependence, 171, 174–181.
35. Kanayama, G., Hudson, J. I., & Pope, H. G. (2020). Long-term psychiatric and medical consequences of anabolic-androgenic steroid abuse. Drug and Alcohol Dependence, 98(1–2), 1–12.
36. Kanayama, G., Hudson, J. I., & Pope, H. G. (2022). Illicit anabolic-androgenic steroid use: prevalence, complications, and policy. Drug and Alcohol Dependence, 236, 109466.
37. Kicman, A. T. (2008). Pharmacology of anabolic steroids. British Journal of Pharmacology, 154(3), 502–521.
38. Korkusuz, P., et al. (2020). Acne associated with anabolic steroid use: clinical features and management. Dermatology Therapy, 33(5), e13834.
39. Koundourakis, N. E., et al. (2014). Hormonal Responses and Physical Performance in Soccer Players. Hormones, 13(2), 182–196.
40. Latchman, D. S. (1997).
41. Lestingi, A., Rossi, M., & Bianchi, A. (2021). Reproductive endocrine effects of anabolic steroids in women. Fertility Research and Practice, 7(1), 12.
42. Llewellyn, W., & Baggish, A. (2020). Dermatologic and wound-healing complications of performance-enhancing drugs. Clinical Dermatology, 38(3), 375–382.
43. Lorenzo, J. M., et al. (2011). Use of anabolic steroids in livestock production. Meat Science, 89(2), 104–110.
44. Magnolini, R., et al. (2022). Fake anabolic androgenic steroids on the market: A systematic review. Frontiers in Pharmacology, 13.
45. Magnolini, R., Falcato, L., et al. (2022). Fake anabolic androgenic steroids on the market: systematic review and meta-analysis. BMC Public Health, 22, 1371.
46. Maughan, R. J. (2004). The Encyclopaedia of Sports Medicine: An IOC Medical Commission Publication. Wiley-Blackwell.
47. McGinnis, J. A., et al. (2013). Anabolic steroids in animal production and food safety. Food Chemistry.
48. Mihan, R., et al. (2021). Severe acne and scarring after anabolic androgenic steroid use: case series and review. Journal of Cosmetic Dermatology, 20(3), 789–796.
49. Morton, R. W., Murphy, K. T., McKellar, S. R., Schoenfeld, B. J., Henselmans, M., Helms, E., Aragon, A. A., Devries, M. C., Banfield, L., Krieger, J. W., & Phillips, S. M. (2018). A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein

supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. British Journal of Sports Medicine, 52(6), 376–384.

50. Nieschlag, E., & Vorona, E. (2022). Medical aspects of anabolic-androgenic steroid use. Endocrine Metabolic Science, 12, 100120.
51. Nishida, Y., et al. (2024). Cell-specific functions of androgen receptor in skeletal muscles. Endocrine Journal, 71(5).
52. Öztürk, A., et al. (2020). Striae distensae in athletes after rapid muscle gain: prevalence and prevention. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 73(6), 1125–1132.
53. Pope, H. G., Wood, R. I., & Kanayama, G. (2020). Anabolic-androgenic steroids: abuse and neuropsychiatric effects. Current Psychiatry Reports, 22, 68.
54. Pope, H. G., Wood, R. I., Rogol, A., Nyberg, F., Bowers, L., & Bhasin, S. (2014). Adverse health consequences of performance-enhancing drugs: An Endocrine Society scientific statement. Endocrine Reviews, 35(3), 341–375.
55. Principales voies de signalisation activées par la GH. (2023). Revue d'Endocrinologie.
56. Quigley, C. A., de Bellis, A., Marschke, K. B., El Awady, M. K., Wilson, E. M., & French, F. S. (1995). Androgen receptor defects: Historical, clinical, and molecular perspectives. Endocrine Reviews, 16(3), 271–321.
57. Rizk, J., Sahu, R., & Duteil, D. (2023). Effects of anabolic steroids on human physiology. Journal of Clinical Medicine, 12(4), 1150.
58. Roger, E. (2024). Revue pharmacologique des médicaments dopants: mécanismes d'action et effets sur la performance sportive (p.16).
59. Rossi, A., Formenti, D., Cavaggioni, L., Alberti, G., Esposito, F., D'Angelo, F., … & Trecroci, A. (2021). Single and combined effect of kinesio tape and warm-up on sprint cycling performance. BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 13, 77.
60. Rossi, A., Perri, E., Pappalardo, L., Cintia, P., Alberti, G., Norman, D., & Iaia, F. M. (2022). Wellness forecasting by external and internal workloads in elite soccer players: A machine learning approach. Frontiers in Physiology, 13, 896928.
61. Sader, M. A., Griffiths, K. A., McCredie, R. J., Handelsman, D. J., & Celermajer, D. S. (2001). Androgenic anabolic steroids and arterial structure and function in male bodybuilders. Journal of the American College of Cardiology, 37(1), 224–230.
62. Saito, M. (2020). Growth hormone signaling pathways and anabolic effects. Endocrine Journal, 67(5), 455–470.

63. Shrestha, S. (2011). *Mechanism of action of steroid hormones: Animation*. MedchromeTube. https://tube.medchrome.com/2011/10/mechanism-of-action-of-steroid-hormones.html
64. Shutterstock. (2026). Growth hormone or somatotropin secreted by pituitary gland [Image].
65. StatPearls. (2025). Anabolic Steroids. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
66. Svensson, E. I., & Connallon, T. (2019). *How frequency-dependent selection affects population fitness, maladaptation and evolutionary rescue. Evolutionary Applications*, 12(7).
67. Vujovic, A., & Del Marmol, V. (2026). Schematic of the general mechanism of androgen action. In Female Pattern Hair Loss: Review of Etiopathogenesis and Diagnosis.
68. WADA (World Anti-Doping Agency). (2019). World Anti-Doping Code.
69. Williams, M. H. (2005). Ergogenic Aids in Sport. Human Kinetics.
70. Yesalis, C. E. (Ed.). (2000). Anabolic steroids in sport and exercise (2nd ed.). Human Kinetics. ISBN 978-0880117869.
71. Yesalis C.E., Bahrke M.S. (2002). Stéroïdes anabolisants androgènes et substances apparentées. Current Sports Medicine Reports 1(4):p 246-252,
72. Yesalis, C. E., & Bahrke, M. S. (2022). Anabolic-androgenic steroid use and abuse. Academic Press.
73. Żywiec, W., Dorota, A., Kozłowski, K., et al. (2025). Impact of Anabolic Steroids on Tendons: A Narrative Review. Cureus, 17(10), e93649.

Liste des sites:

Site 1: (MasMusculo – GH Hormone Regulator BioTech USA Consulté 2026)

Site 2: (Shutterstock – Growth hormone or somatotropin secreted by pituitary gland mai 2026.)

Site 3: (ONAD Monaco – Tout savoir sur les bêta2-agonistes, la codéine et l'hygénamine mai 2017)

Site 4: (Principales voies de signalisation activées par la GH 2023)

Site 5: https://www.vecteezy.com/photo/14398841-muscular-man-with-a-syringe-in-his-hand-and-testosterone-formula

Site 6: https://www.indiamart.com/proddetail/trenbolone-acetate-injection-2853857659412.html?srsltid=AfmBOooYsvsvzajcRaeqZpD4KCtR3i-dK9hAUU1XhfEP38quYJ8ZCqgp

Site 7: American phisiologycal society 2021

Site 8: (journal American phisiologycal society 2021)

Site 9: (Canada. Ministère de la Défense nationale. (2016). Fiche d'information sur les stéroïdes anabolisants.)

RÉSUMÉ

Les hormones anabolisantes, principalement les stéroïdes anabolisants androgéniques (SAA), les hormones peptidiques et certains agents non stéroïdiens, constituent des substances pharmacologiques aux propriétés anabolisantes puissantes. Agissant via les récepteurs androgènes nucléaires et des voies de signalisation telles que mTOR et IGF-1, elles stimulent la synthèse protéique, l'hypertrophie musculaire et la récupération physique. Si leur usage thérapeutique est reconnu dans le traitement de pathologies comme l'hypogonadisme ou la cachexie, leur détournement à des fins sportives a engendré un phénomène de dopage aux conséquences sanitaires, éthiques et sociales considérables. À l'échelle moléculaire, une exposition prolongée induit stress oxydatif, instabilité génomique et modifications épigénétiques potentiellement héréditaires, augmentant le risque de pathologies graves. Le développement d'un marché illicite, offrant des produits contrefaits et contaminés, aggrave davantage ces risques. Face à ces enjeux, une approche pluridisciplinaire combinant prévention, encadrement médical, contrôle antidopage et recherche scientifique s'avère indispensable.

Mots clés: Stéroïdes anabolisants androgéniques, Dopage sportif, Récepteurs androgènes, Instabilité génomique, Santé publique

Genetic and epigenetic effects of anabolic hormones and other injectable substances in bodybuilding

Abstract

Anabolic hormones, primarily anabolic androgenic steroids (AAS), peptide hormones, and certain non-steroidal agents, are pharmacological substances with potent anabolic properties. Acting through nuclear androgen receptors and signaling pathways such as mTOR and IGF-1, they stimulate protein synthesis, muscle hypertrophy, and physical recovery. While their therapeutic use is recognized in conditions such as hypogonadism and cachexia, their misuse in sports has generated a doping phenomenon with significant health, ethical, and social consequences. At the molecular level, prolonged exposure induces oxidative stress, genomic instability, and potentially heritable epigenetic modifications, increasing the risk of serious pathologies. The development of an illicit market, supplying counterfeit and contaminated products, further amplifies these risks. A multidisciplinary approach combining prevention, medical supervision, anti-doping control, and scientific research is therefore essential.

Keywords: Anabolic androgenic steroids , Sports doping, Androgen receptors , Genomic instability , Public health.

التأثيرات الوراثية والوراثية للهرمونات الابتنائية والمواد الأخرى القابلة للحقن في كمال الأجسام

ملخص

الهرمونات الابتنائية، وخاصة الستيرويدات الأندروجينية الابتنائية (AAS)، والهرمونات الببتيدية، وبعض العوامل غير الستيرويدية، هي مواد دوائية ذات خصائص ابتنائية قوية. تعمل عبر مستقبلات الأندروجين النووية ومسارات الإشارة مثل mTOR وIGF-1، مما يحفز تخليق البروتين، وتضخم العضلات، والتعافي الجسدي. بينما يعرف استخدامها العلاجي في علاج أمراض مثل نقص الغدد التناسلية أو الكاشية، إلا أن تحويلها لأغراض رياضية أدى إلى ظاهرة تعاطي المنشطات ذات عواقب صحية وأخلاقية واجتماعية كبيرة. على المستوى الجزيئي، يؤدي التعرض المطول إلى إجهاد تأكسدي، وعدم استقرار جينومي، وتغيرات فوق جينية محتملة وراثية، مما يزيد من خطر الأمراض الخطيرة. إن تطوير سوق غير قانوني يقدم منتجات مزيفة وملوثة يزيد من تفاقم هذه المخاطر. في مواجهة هذه التحديات، يعد من الضروري اتباع نهج متعدد التخصصات يجمع بين الوقاية والإشراف الطبي والسيطرة على مكافحة المنشطات والبحث العلمي

الكلمات المفتاحية: الستيرويدات الابتنائية الأندروجينية التنشيط الرياضي المصطنع المستقبلات الأندروجينية عدم الاستقرار الجينومي، الصحة العامة