

METABOLISME DES ACIDES AMINES

Les acides constituent les monomères des protéines car en plus du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène rencontrés dans les glucides et les lipides, ils contiennent de l'azote. Chez les animaux leur source est essentiellement alimentaire contrairement aux glucides et lipides, les acides aminés en excès ne peuvent être stockés, ils sont alors rapidement dégradés par transamination ou oxydation pour donner un ion ammonium et un squelette carboné. L'ion ammonium est éliminé par excrétion ou par l'uréogénèse ou recyclé pour la synthèse d'un autre acide aminé. Le squelette carboné peut aussi être réutilisé pour reformer l'acide aminé correspondant ou servir de précurseurs soit à la synthèse des glucides (cas des squelettes des acides aminés dits glycoformateurs), soit à la synthèse des acides gras (cas des squelettes des acides aminés dits cétoènes).

I-METABOLISME DES A.A :

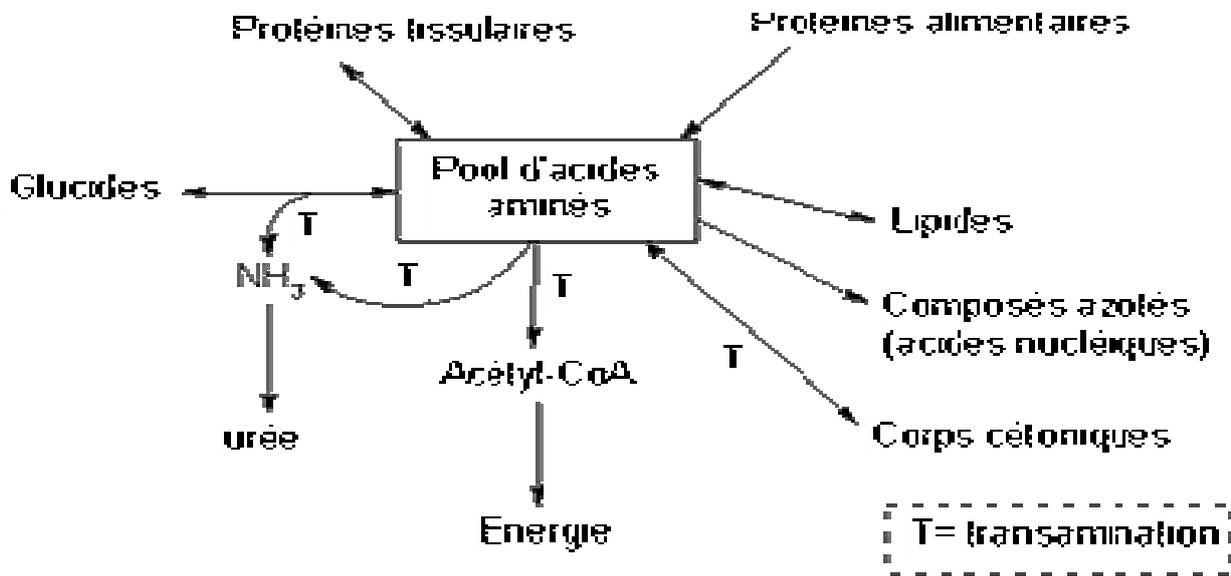
Les acides aminés qui ne peuvent être synthétisés par l'organisme et doivent être apportés par l'alimentation sont appelés acides aminés essentiels. Chez l'homme, (histidine, isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phenylalanine, threonine, tryptophane, valine). Les 12 autres sont produits *in vivo* par le métabolisme des cellules — l'un d'entre eux, contenant un atome de sélénium, est même « finalisé » alors qu'il est déjà sur son ARN de transfert. Certains régimes alimentaires ne permettent pas de synthétiser en quantité suffisante tous les acides aminés non essentiels, et certains d'entre eux doivent alors également être apportés par l'alimentation : l'arginine, la cystéine, le glutamate, la glycine et la tyrosine. Lorsque les protéines se décomposent dans l'intestin, les acides aminés sont "libérés" du "collier". Ainsi, ils peuvent pénétrer la paroi intestinale. Ils se mélangent par la suite à d'autres acides aminés (notamment ceux provenant des protéines corporelles dégradées) pour former le "pool des acides aminés". De ce "pool" sont choisis les acides aminés dont l'organisme a besoin pour synthétiser les protéines qui lui manquent. Une fois choisis, ils sont liés dans le ribosome des cellules qui, eux, déterminent l'ordre des différentes "perles" à partir de l'information détenue dans l'ADN. D'autres acides aminés du "pool" sont aussi utilisés pour produire du glucose et des acides gras. Le processus par lequel l'organisme synthétise du glucose à partir des acides aminés s'appelle la "néoglucogénèse". Il consiste tout d'abord en la suppression du groupe amine (la partie NH₂) grâce à une réaction impliquant de la pyridoxine (vitamine B₆). Le groupe amine, qui est maintenant sous forme d'ammoniac (NH₃) est tout de suite transformé en urée par le foie car cette substance est toxique. Le foie transforme ensuite le restant du groupe (appelé chaîne carbonée) en glucose ou en acides gras (qui sont les éléments de bases des lipides), ou aucun. Cela dépend si la

chaîne carbonée est glucogénique (transformable en glucose) ou cétogénique (transformable en acides gras). Cette capacité est importante dans les cas d'une glycémie trop faible. Les dipeptides absorbés au niveau de l'intestin grêle sont hydrolysés en acides aminés dans le cytosol des cellules intestinales et acheminés vers le foie ou ils sont métabolisés ou libérés dans la circulation générale.

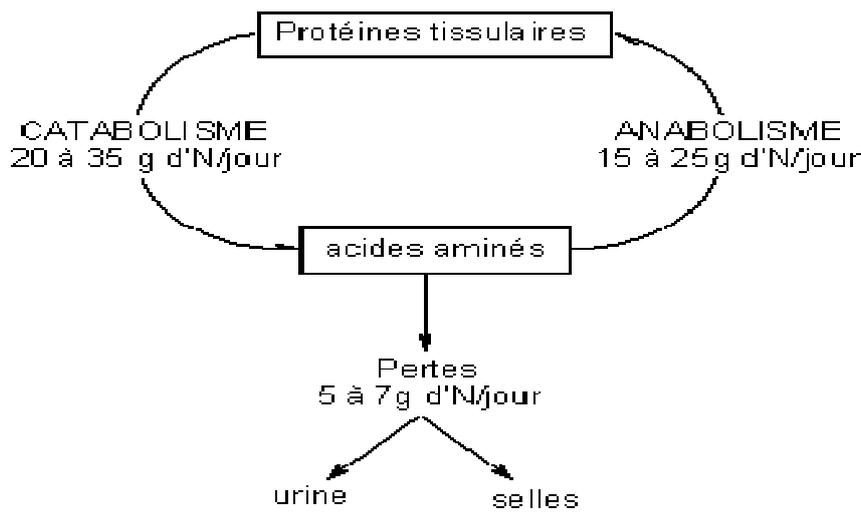
I-Devenir des protéines alimentaires :

Alimentation ⇒ protéines alimentaires (végétales et animales) ⇒ acides aminés (par l'action de protéases)

Acides aminés non-indispensables, indispensables (Tryptophane, Lysine, Leucine, Isoleucine, Valine, Thréonine, Méthionine, Phénylalanine), acides aminés pseudo indispensables (Arginine, Histidine).



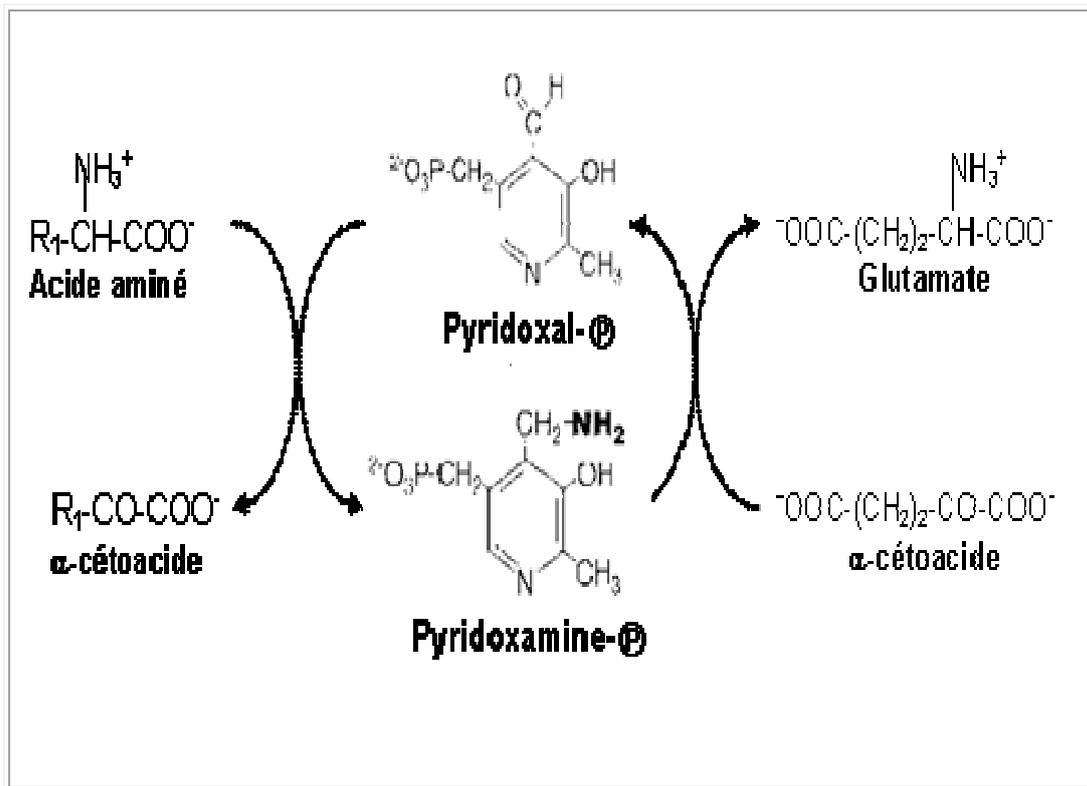
1 à 2% des protéines tissulaires sont dégradés en acides aminés et 75% d'entre-deux servent à synthétiser d'autres protéines. Le reste est soit dégradé sous forme de déchets urée, soit on en fait des glucides ou des corps cétoniques. Il n'y a pas de stockage d'acides aminés. Le bilan de N est équilibre soit entrées = sortie mais parfois il peut être positif Entrée > Sortie (ex : femme enceinte, nourrisson, adolescent) ou bien peut être négatif Entrée < Sortie.



II- DEGRADATION DES ACIDES AMINES : Ils subissent une première dégradation qui par transamination ou par oxydation enlève le groupement α -aminé. L'ion ammonium récupéré est recyclé pour former un autre acide aminé ou éliminé. Ainsi, le squelette carboné obtenu peut aussi être récupéré pour synthétiser l'acide aminé correspondant ou servir de précurseur à la synthèse des glucides (cas des acides aminés glycoformateurs) ou convertis en acétyl-CoA pour la synthèse des acides gras (cas des acides gras cétoènes).

1)-TRANSAMINATION :

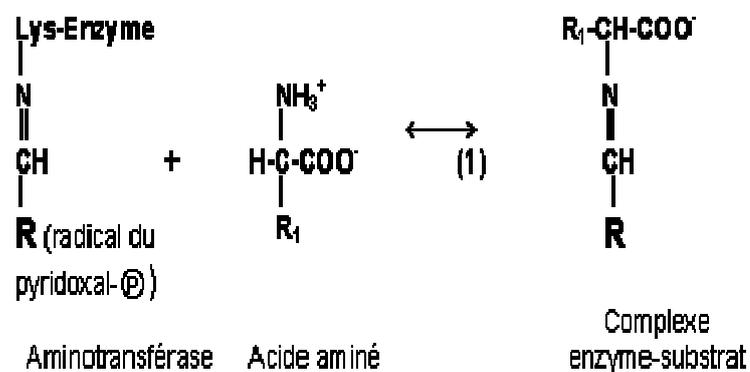
A)- LES AMINOTRANSFERASES : La transamination ou l'aminotransfert (processus conduisant à un échange du groupement α -aminé entre un acide aminé et un α -céto-acide) est la réaction générale du métabolisme des acides aminés car elle intervient aussi bien dans leur catabolisme que dans leur synthèse. Les enzymes qui catalysent ces réactions sont dites **amino-transférases** ou **transaminases** qui existent dans tous les tissus (réaction réversible). Le cofacteur impliqué est le pyridoxal phosphate (groupement prosthétique de toutes les amino-transférases) qui dérive de la vitamine B6 et l'accepteur du groupement α -aminé est toujours l' α -céto-glutarate dans ce cas il en résulte la formation d'un glutamate. Deux amino-transférases : **Aspartate amin-o-transférase** et **Alanine amino-transférase** sont considérées comme des marqueurs importants lorsqu'on les retrouve, dans, le sang.



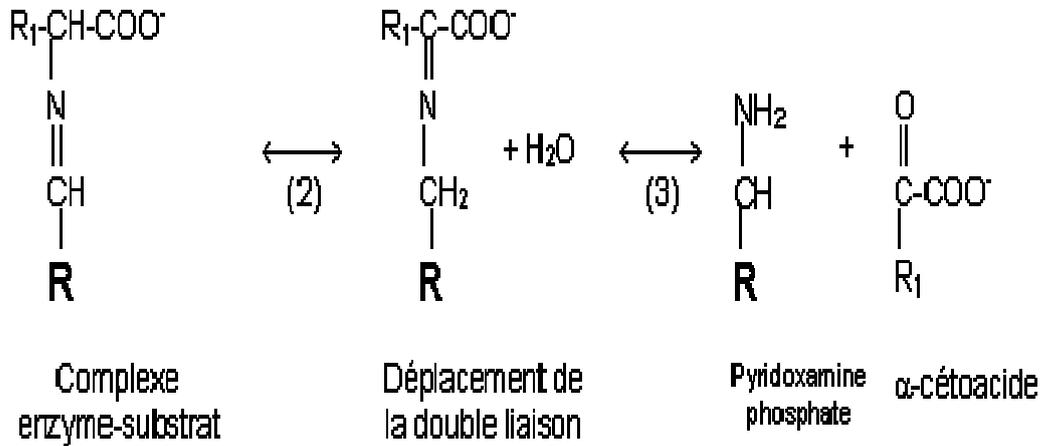
Réaction catalysée par une amino transférase.

--- **MECANISME DE LA TRANSAMINATION :**

Le pyridoxal phosphate est lié au reste lysine de l'apoenzyme des amino-transférases par une liaison covalente. La formation du complexe enzyme-substrat se traduit par la rupture de la liaison avec la lysine et sa reformation avec l' α -amine de l'acide aminé (étape 1). Après déplacement de la double liaison (étape 2) et l'hydrolyse du complexe (étape 3), le groupement α -aminé est transféré sur le coenzyme pour former la pyridoxamine phosphate et la libération du squelette carboné de l'acide aminé dégradé. En présence de l' α -cétoglutarate les trois étapes se déroulent en sens inverse et conduisent à la formation du glutamate.



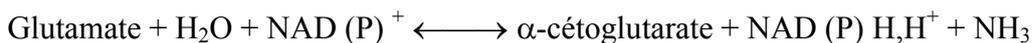
Transamination : (1) Prise en charge de l'acide aminé avec formation d'une liaison covalente, (2) déplacement de la double liaison et (3) Hydrolyse.



B)- DESAMINATION OXYDATIVE :

Contrairement à la transamination, c'est une réaction de transfert du groupement α -aminé, la désamination oxydative le libère sous forme d'ammoniac libre avec formation du squelette α -céto-acide correspondant. Elle est très active dans le foie et dans les reins où deux types d'enzymes interviennent : la *glutamate déshydrogénase* et l'*acide aminé oxydase*.

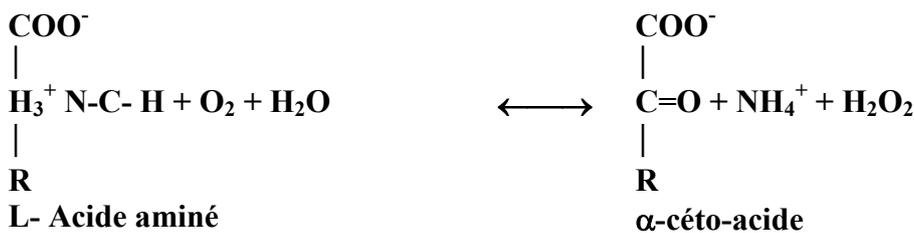
---**GLUTAMATE DESHYDROGENASE** : La désamination oxydative est précédée par la transamination dans le catabolisme des acides aminés et la *glutamate déshydrogénase* intervient en sens inverse dans la réaction en utilisant le $NADP^+$ dans l'assimilation de l'ammoniac (voie de synthèse) et le NAD^+ dans la désamination oxydative (voie de dégradation).



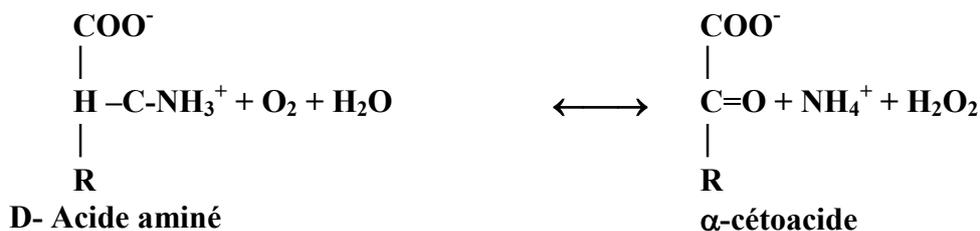
La *glutamate déshydrogénase* fait l'objet d'une régulation allostérique, inhibée par ATP et GTP mais activée par ADP et GDP. Le sens dépend des concentrations relatives du glutamate, de l' α -cétoglutarate, de NH_3 et du rapport des formes réduites et oxydées des coenzymes ($NADPH, H^+/NADP^+$ et $NADH, H^+/NAD^+$).

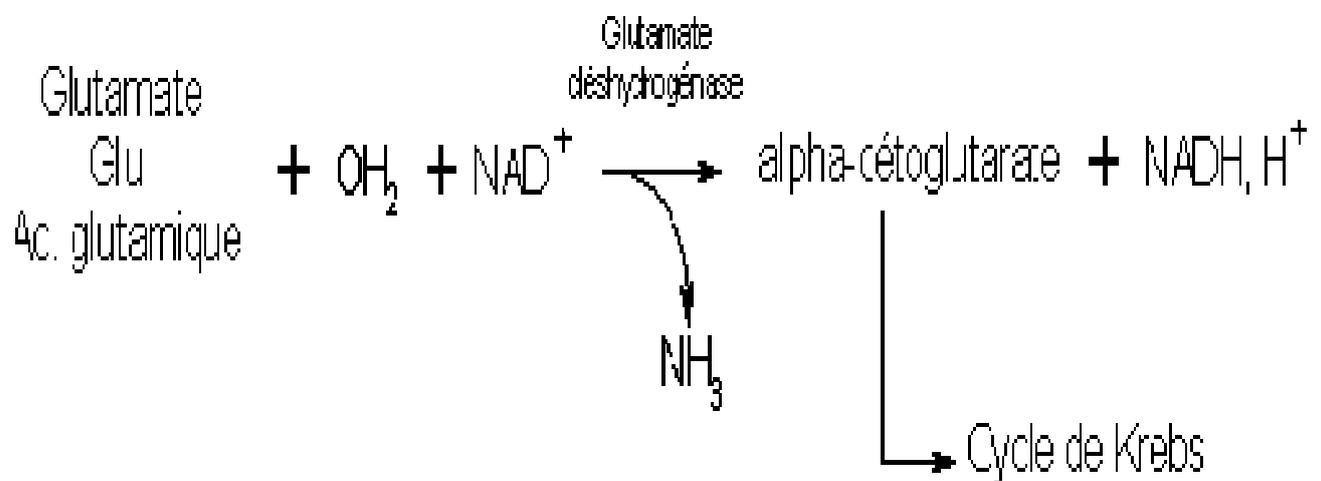
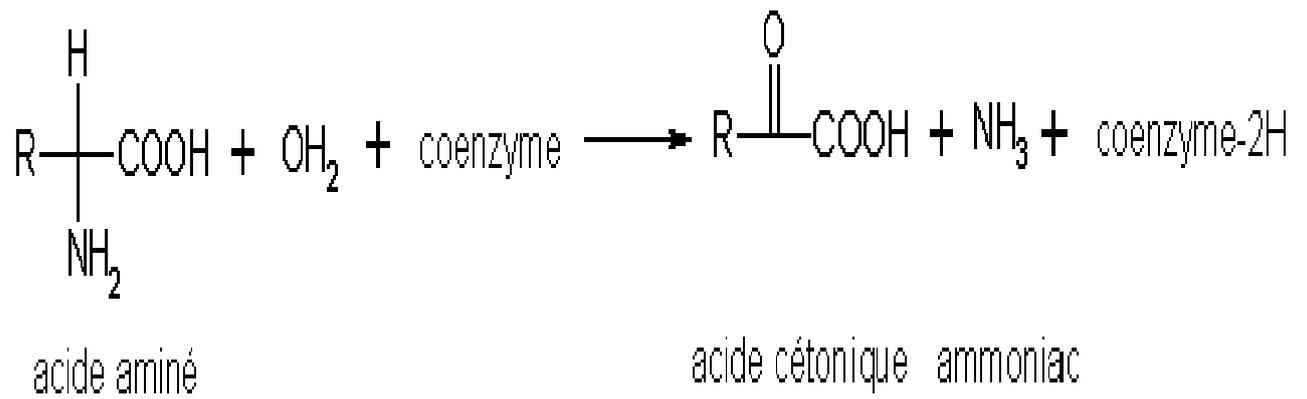
--- **OXYDASES DES ACIDES AMINES**

*** **L-acide aminé oxydase (L-aminoacide oxydase)** est une enzyme hépatique et oxyde les acides aminés en transférant directement les électrons récupérés par le coenzyme à l'oxygène moléculaire. Il en résulte la formation la libération de l' α -cétoacide correspondant, de NH_3 et la formation de H_2O_2 (péroxyde d'hydrogène) décomposé par les catalases. La réaction globale s'écrit :

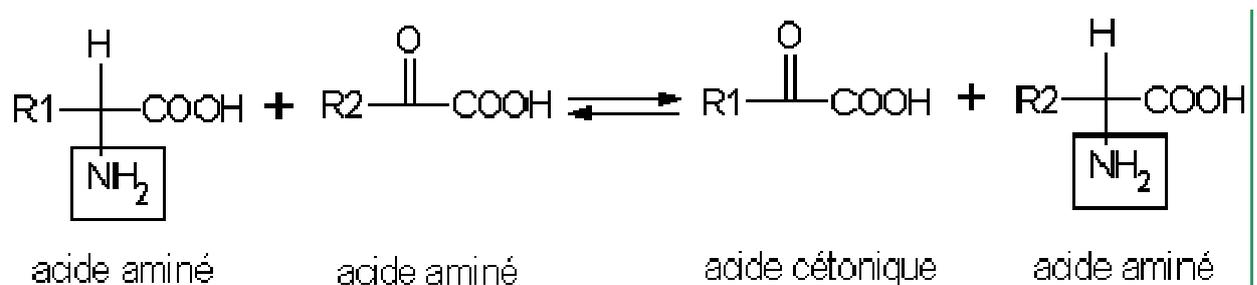


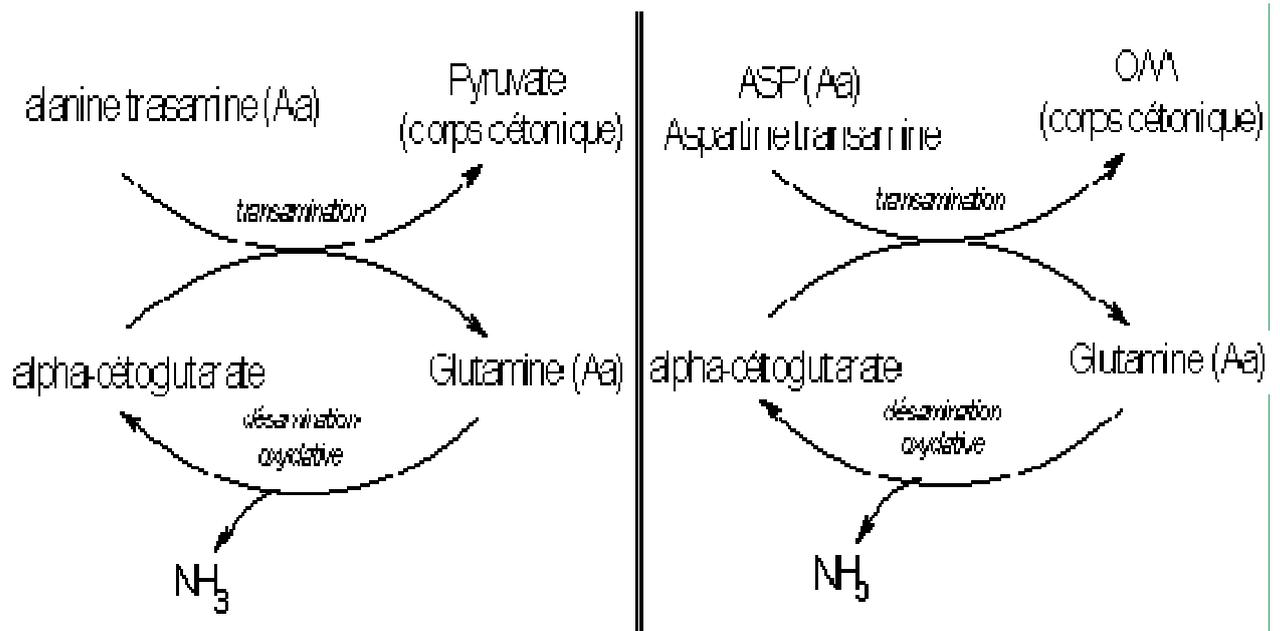
*****D-acide aminé oxydase (D-aminoacide oxydase)** : Enzyme à activité importante dans le foie et les reins qui oxyde les D-acides aminés (isomères des L-acides aminés, non rencontrés chez les animaux) provenant de l'hydrolyse des protéines des végétaux et des membranes cellulaires des microorganismes. Ces D-acides aminés sont oxydés suivant le même principe que précédemment mais par la **D-acide aminé oxydase** à FAD avec la libération de l' α -cétoacide correspondant, de NH_3 et la formation de H_2O_2 (péroxyde d'hydrogène) décomposé par les catalases. La réaction globale est la même.



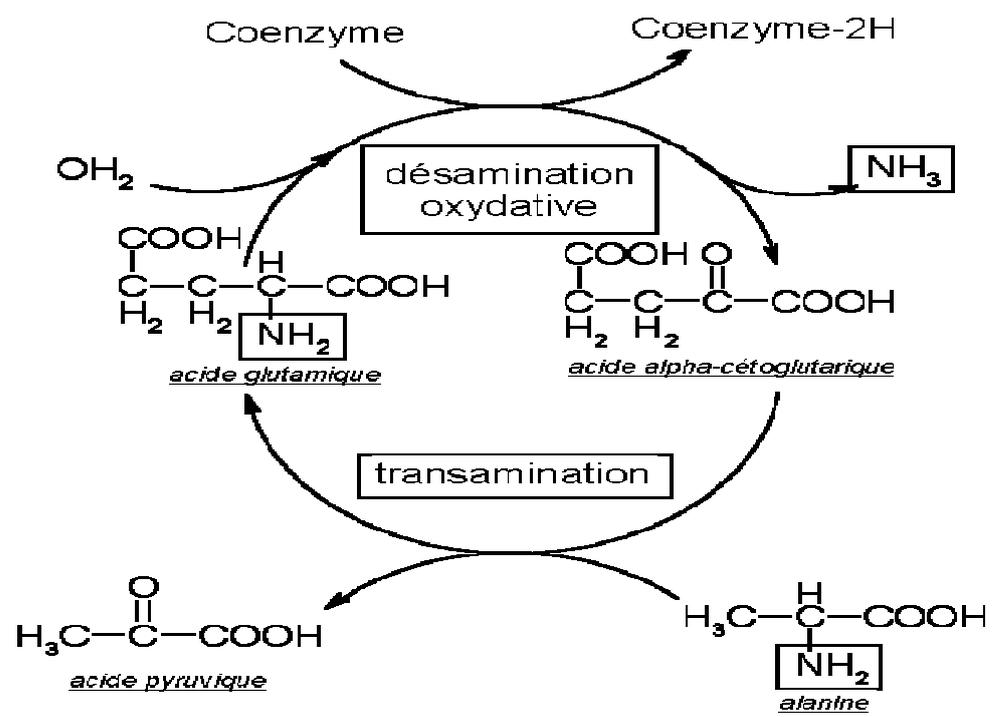
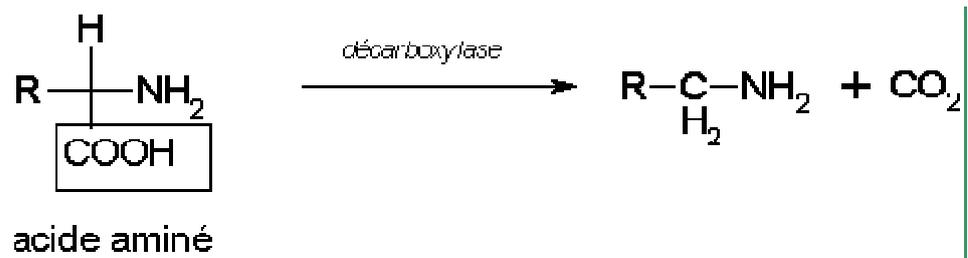


Réaction de transamination : réaction de transfert de la fonction amine.





REACTION DE DECARBOXYLATION :



Devenir de l'ammoniac : Cycle de l'urée : consomme 4 molécules d'ATP par molécule d'urée synthétisée

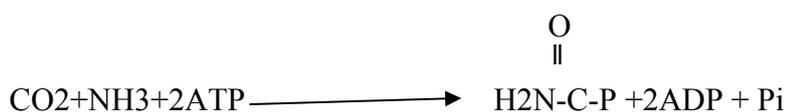
3 - UREOGENESE OU CYCLE DE L'UREE (ELIMINATION DE L'ION AMMONIUM)

Les acides aminés sont la principale source de formation de l'ammoniac dans l'organisme. L'excès d'ammoniac ou d'ion ammonium doit être éliminé chez les autres vertébrés terrestres sous forme d'urée. La séquence des réactions qui vont intervenir comporte une phase mitochondriale et une phase cytosolique. Elle ne se déroule que dans le foie.

a)-PHASE MITOCHONDRIALE :

---SYNTHESE DU CARBAMOYLPHOSPHATE :

Dans les mitochondries la *carbamoylphosphate synthétase* utilise le CO₂, le NH₃ et 2 ATP comme substrats pour former le carbamoylphosphate. Deux liaisons phosphates riches en énergie sont consommées.



--- -- SYNTHÈSE DE LA CITRULLINE :

Une fois le carbamoyl phosphate formé, il est rejoint par l'ornithine transportée du cytosol. Sous l'action de *l'ornithine carbamoyltransférase* (transcarbamylase) le radical carbamoyle est transféré sur l'ornithine pour former la citrulline.



b)-PHASE CYTOSOLIQUE :

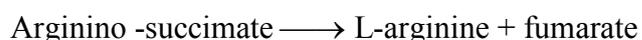
-- - FORMATION DE L'ARGININOSUCCINATE :

La citrulline obtenue est transportée dans le cytosol qui sous l'action de *l'argininosuccinate synthétase* se condense avec l'aspartate pour donner l'argininosuccinate avec consommation de deux liaisons phosphates riches en énergie d'une molécule d'ATP.



-- -- FORMATION DE L'ARGININE

Elle est catalysée par une *argininosuccinate lyase* qui assure le clivage en L-arginine et en fumarate. Cette réaction intervient aussi dans la synthèse de l'arginine.



Le fumarate est transporté dans les mitochondries et repris par le cycle de Krebs qui l'oxyde en oxaloacétate. Ce dernier sera transaminé en aspartate par *l'aspartate*

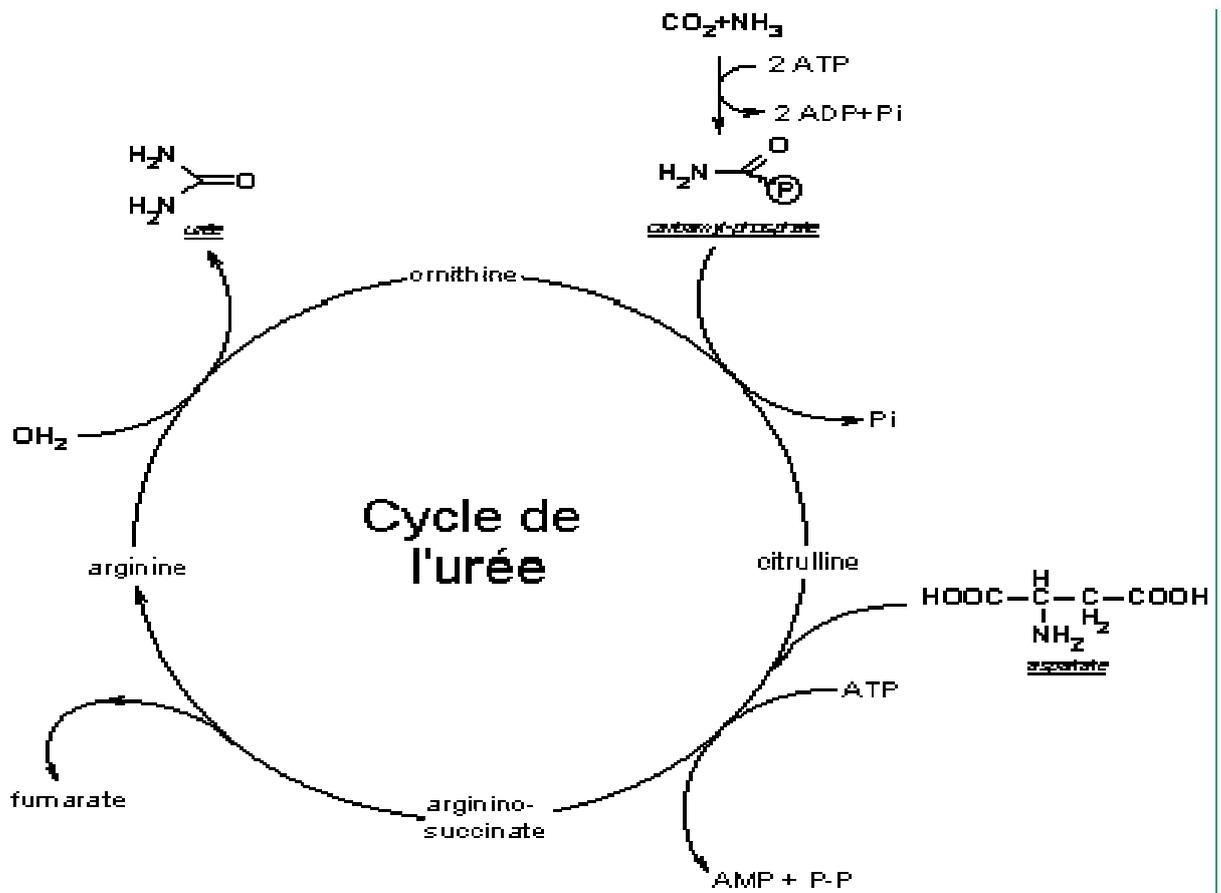
aminotransférase. Ainsi est créé un lien entre les deux cycles de Krebs et de l'Urée.

--- - HYDROLYSE DE L'ARGININE

L'hydrolyse de l'arginine termine le cycle. Il se forme alors de l'urée et de l'ornithine (réaction est catalysée par l'*arginase*).

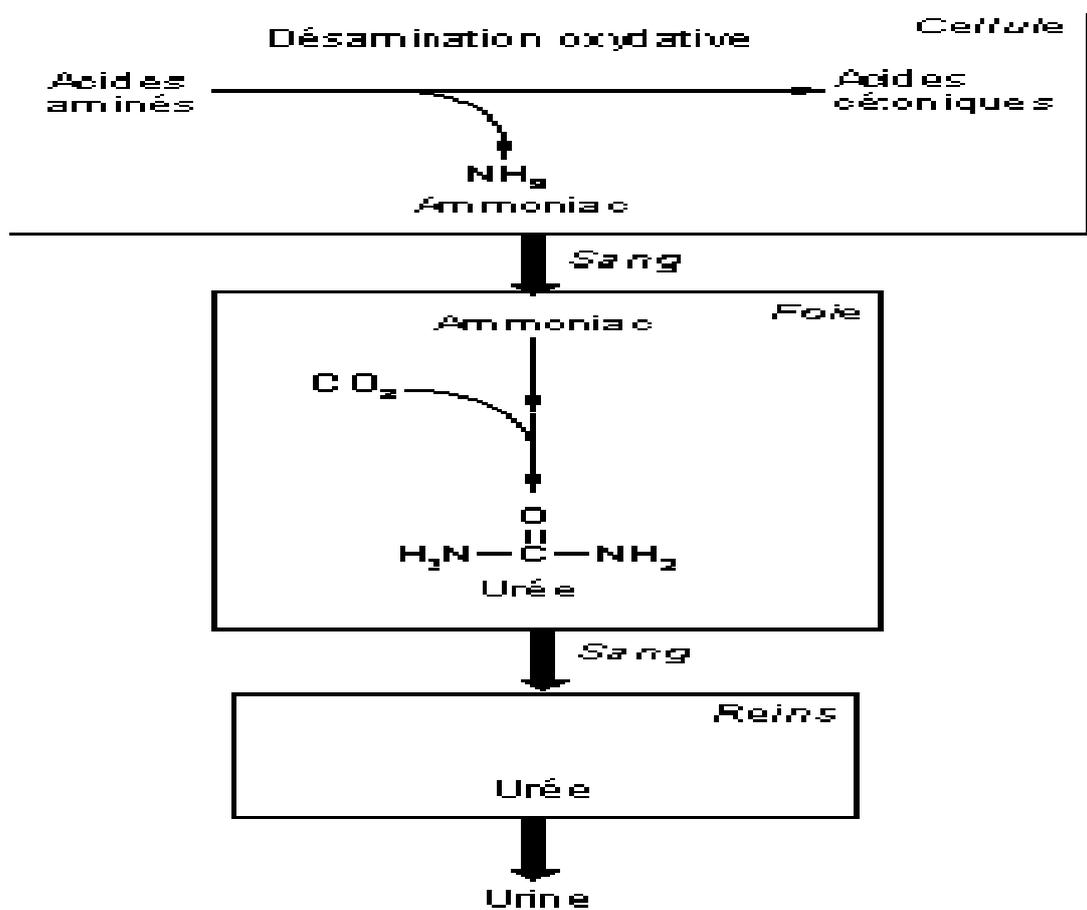
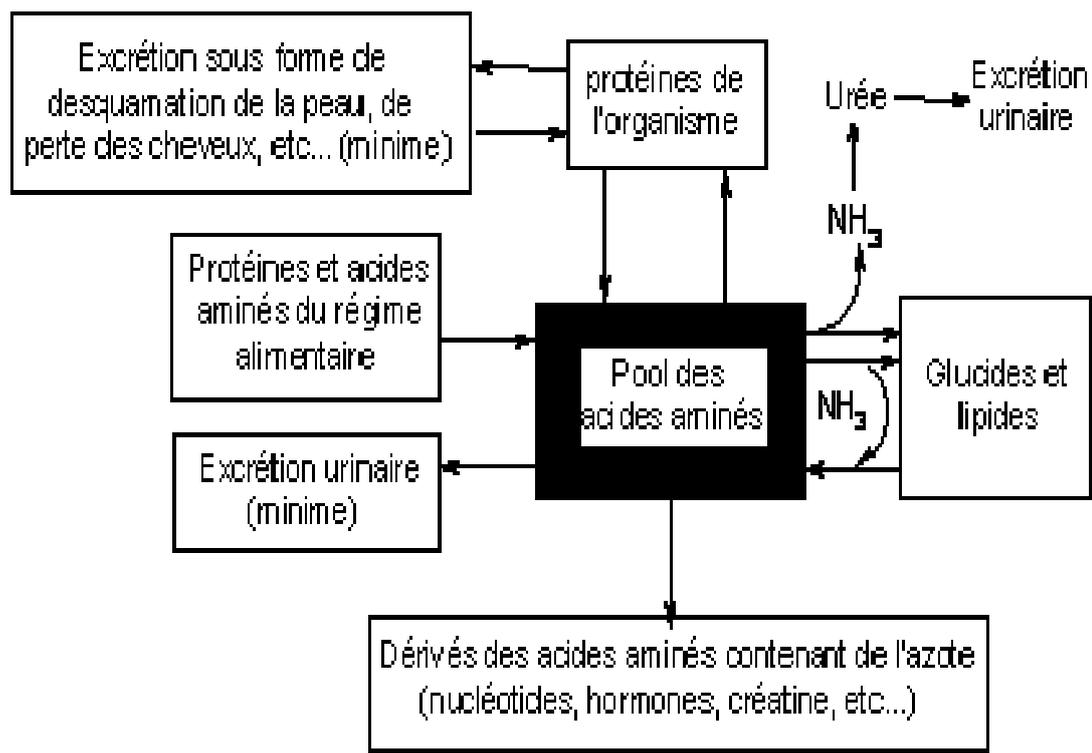


L'urée est excrétée pour être éliminée par l'urine et l'ornithine et transportée dans les mitochondries pour ré-initier le cycle.



Cette voie est consommatrice d'ATP : l'organisme doit dépenser de l'énergie pour ce processus de détoxification.

Bilan énergétique : - 4 ATP / mole d'urée synthétisée.



4– DEVENIR DU SQUELETTE CARBONE

Après l'élimination du groupe α -aminé sous forme d'ammoniac, les 20 acides aminés, des protéines, libèrent chacun l' α -cétoacide (squelette carboné) correspondant. La dégradation des 20 squelettes carbonés conduisent à la formation de sept composés à savoir : α -cétoglutarate, oxaloacétate, fumarate, acétoacétyl-CoA, succinyl-CoA, pyruvate et acétyl-CoA. Ils rentrent dans le métabolisme intermédiaire pour la production de l'énergie ou pour la synthèse des glucides ou des lipides. Suivant le devenir des squelettes carboné on classe les acides aminés en trois groupes :

a- Les acides aminés glucoformateurs (glucogéniques) dont la dégradation du squelette carboné libèrent l'un des intermédiaires suivants : α -cétoglutarate, oxaloacétate, fumarate, succinyl-CoA et pyruvate. Cette classe couvre les acides aminés non essentiels : alanine, asparagine, aspartate, glutamate, glutamine, proline, glycocole, sérine, cystéine ; et parmi les acides aminés essentiels : arginine, histidine, méthionine, thréonine et valine.

b- Les acides aminés cétoènes (ou cétoniques) dont la dégradation du squelette carboné fournit l'acétyl-CoA ou l'acétoacétyl-CoA. ou on trouve deux acides aminés essentiels (leucine et lysine).

c- Les acides aminés à la fois glucoformateurs et cétoènes : tyrosine (non essentiel), phénylalanine, tryptophane et isoleucine (tous les 3 essentiels).

--- DEVENIR DES SQUELETTES DES ACIDES AMINES GLUCOFORMATEURS :

Les principaux squelettes carbonés fournis par les acides aminés glucoformateurs sont : l'oxaloacétate, l' α -cétoglutarate et le pyruvate.

***** – OXALOACETATE :**

Il est le squelette carboné de l'asparagine et de l'aspartate. L'asparagine est hydrolysée par l'*arginase* en aspartate et en ammoniac. L'aspartate subit la transamination et libère de l'oxaloacétate, récupéré pour former l'acide aminé correspondant ou entrer dans la néoglucogénèse pour former du glucose et de l'ammoniac.

*** – α -CETOGLUTARATE

La dégradation de la glutamine, de la proline, de l'arginine, de l'histidine et du glutamate conduit à l' α -cétoglutarate.

a- La **Glutamine** est hydrolysée en glutamate oxydé en α -cétoglutarate par transamination ou oxydation en présence de la *glutamate déshydrogénase* et en ammoniac par la *glutaminase*.

b - La **Proline** est oxydée en Δ^1 pyrroline 5-carboxylate puis une seconde fois en glutamate qui est transaminé en α -cétoglutarate.

c- L'**Arginine** est hydrolysée par l'arginase en ornithine et en urée. L'ornithine subit une transamination qui la transforme en glutamate γ -semi aldéhyde qui sera converti en α -cétoglutarate.

d - L'**Histidine** subit une séquence de réactions qui conduit à la formation du N-formiminino-glutamate. Le transfert du groupe formiminine sur le tétrahydrofolate libère le glutamate, oxydé ensuite en α -cétoglutarate.

L' α -cétoglutarate, issu de tous ces acides aminés, est oxydé dans le cycle tricarboxylate jusqu'au malate qui est transporté dans le cytosol pour servir de précurseur à la néoglucogenèse.

*** – PYRUVATE

La dégradation de l'alanine, la cystéine, la sérine, du glycolle et de la thréonine conduit au pyruvate.

a- L'**Alanine** est transaminé pour former du pyruvate

b- La **cystéine** subit une désulfuration et donne du pyruvate.

c- La **sérine** par déshydratation et transamination peut être convertie en pyruvate. Mais elle peut aussi être le précurseur du glycolle. Dans ce cas, il y a transfert d'un carbone sur le tétrahydrofolate

d- Le glycolle (glycine) peut être transformé en sérine par transfert du groupement méthylène fourni par N⁵,N¹⁰-méthylène tétrahydrofolate ou tout simplement être oxydé en CO₂ et en NH₃.

*** – SUCCINYL-COA (SUCCINYL COENZYME A)

Le succinyl-CoA est formé suite à la dégradation des squelettes carbonés de la méthionine, isoleucine, valine, leucine et thréonine. Ces acides aminés sont glucoformateurs car le

succinyl-CoA est un intermédiaire du Cycle Tricarboxylique. Son oxydation conduit donc à la formation du malate, précurseur de la néoglucogenèse.

a- La **Méthionine** est un acide aminé essentiel qui peut servir de précurseur à la synthèse de la S-Adénosyl méthionine SAM, coenzyme donneur du groupe méthyle dans les réactions de méthylation. Dans la réaction mettant en présence l'ATP et la méthionine, la formation de SAM entraîne le dégagement de 3 groupes phosphates de l'ATP.



L'enlèvement du groupe méthyle activé des SAM entraîne la formation de la S-Adénosylhomocystéine qui est hydrolysée en Adénosine et en homocystéine qui peut

- être récupérée pour resynthétiser la méthionine par transfert d'un groupe méthyle.

- servir de précurseur à la synthèse de la cystéine en se condensant à la L-sérine pour donner la cystathionine dont l'hydrolyse libère la cystéine et l' α -cétobutyrate. Le propionyl-CoA issu de l'oxydation de l' α -cétobutyrate est carboxylé pour donner le succinyl-CoA.

b- La **Thréonine**, après transamination est, déshydratée en α -cétobutyrate qui est oxydé en propionyl-CoA. Ce dernier est carboxylé pour produire du succinyl-CoA.

c- La **valine** et l'**isoleucine** sont deux acides aminés essentiels dont les chaînes aliphatiques sont ramifiées. Après transamination leurs squelettes subissent une déshydrogénation décarboxylante grâce à un complexe enzymatique analogue à celui de la *pyruvate déshydrogénase*. Les produits obtenus subissent une déshydrogénation analogue à celle rencontrée dans la β -oxydation des acides gras b-avec formation du propionyl-CoA qui est ensuite carboxylé en succinyl-CoA. L'isoleucine fournit en même temps de l'acétyl-CoA. Elle est donc glucoformateur et cétogénique.

-- – DEVENIR DES SQUELETTES DES ACIDES AMINES CETOGENIQUES

Les squelettes carbonés de la leucine, de la lysine et du tryptophane sont oxydés et donnent comme produits terminaux l'acétyl-CoA ou l'acétoacétyl-CoA.

a- La **Leucine**, après transamination, donne un squelette carboné qui subit la même séquence de réactions que ceux de la valine et de l'isoleucine. Le produit final est l'acétyl-CoA au lieu du succinyl-CoA. Comparée à l'isoleucine, la leucine est strictement cétogénique.

b- La **Lysine**, contrairement aux autres acides aminés, ne fait l'objet d'aucune transamination sur son groupe α -aminé. Elle subit une séquence de réactions, qui fournit

l' α -aminoacétyl-CoA et l'acétyl-CoA comme produit final qui peut être clivé en acétyl-CoA.

c- Le **Tryptophane** fait aussi l'objet d'une longue séquence de réactions qui donne l'acétyl-CoA.

-- -- DEVENIR DES SQUELETTES DES ACIDES AMINES A LA FOIS GLUCOFORMATEUR ET CETOGENIQUE :

Ce groupe d'acides aminés est constitué de phénylalanine, tyrosine et isoleucine. Ils libèrent après transamination un squelette dont le catabolisme complexe produit, d'une part, du succinyl-CoA ou du fumarate (précurseurs de néoglucogenèse) et, d'autre part, de l'acétyl-CoA ou de l'acétyl-CoA (précurseurs céto-géniques).

a- La **Phénylalanine** est hydroxylée en tyrosine en présence de l'oxygène moléculaire et de tétrahydrobioptérine.

Phénylalanine + O₂ + Tétrahydrobioptérine \longrightarrow Tyrosine + H₂O +
Dihydrobioptérine

b- La **Tyrosine**, après transamination, donne le p-hydroxyphénylpyruvate qui va suivre une séquence de réactions avec formation du fumarate et de l'acétyl-CoA. Le fumarate est repris par le Cycle tricarboxylique pour former du malate, précurseur de la néoglucogenèse et l'acétyl-CoA est converti en acétyl-CoA.

5- BIOSYNTHESE DES ACIDES AMINES

Les précurseurs des acides aminés constituent les α -céto acides directement utilisables pour la transamination ou permettent de les synthétiser. Ils sont générés dans les processus de dégradations dont les principaux sont la glycolyse et le cycle tricarboxylique. Les glucides sont les principaux fournisseurs du carbone, rencontrés dans les acides aminés. Un squelette carboné peut être à l'origine de la synthèse de plusieurs acides aminés. On parle alors de famille.

a)- α -cétoglutarate conduit à la famille de glutamate : glutamate, glutamine, proline, arginine et la lysine.

b)-oxaloacétate donne la famille de l'aspartate : aspartate, asparagine, méthionine, thréonine et l'isoleucine.

c)-glycérate-3-phosphate mène à la famille de la sérine : sérine, glycolle (glycine), la cystéine.

d)-pyruvate fournit la famille de l'alanine : alanine, valine et leucine.

e)-Phosphoénolpyruvate et erythrose-4-phosphate sont le point de départ de la phénylalanine, tyrosin et tryptophane.

f)-Ribose-5-phosphate est le précurseur de l'histidine.

--- - LES DEUX TYPES D'ACIDES AMINES

La croissance et le développement des êtres vivants dépendent de leur approvisionnement en acides aminés au nombre de 20 synthétisés par les plantes supérieures et quelques autres organismes. L'homme n'en synthétise que 10 (acides aminés non indispensables) et les dix autres (acides aminés indispensables) doivent lui être apportés dans l'alimentation sous forme de protéines végétales ou animales.

Acides aminés indispensables et synthétisés par l'organisme humain.

Acides synthétisés	Acides indispensables
Alanine	Isoleucine
Glutamate	tryptophane
glutamine	Leucine
Proline	Lysine
Aspartate	Méthionine
Asparagine	Thréonine
Glycocolle	Phénylalanine
Sérine	Valine
Tyrosine	arginine
Cystéine	Histidine

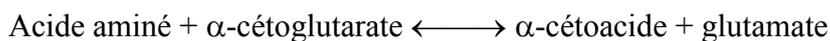
-- - FAMILLE DU GLUTAMATE

*** - GLUTAMATE ET GLUTAMINE

- de la *glutamate déshydrogénase* selon la réaction



- d'une *aminotransférase (transaminase)*



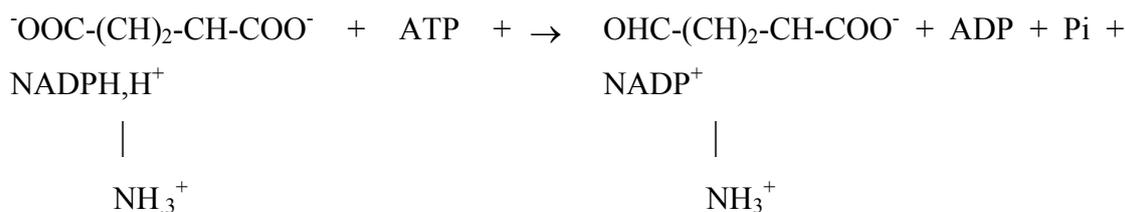
En ce concerne la glutamine elle est synthétisée sous l'action de la **glutamine synthétase** (Voir chapitre sur l'assimilation de l'azote et de l'ammoniac)



*** - **PROLINE**

Elle est formée à partir du glutamate suivant deux étapes

- La fonction carboxylique portée par le carbone 5 est d'abord réduite en aldéhyde. Elle requiert de l'énergie apportée par l'ATP. Elle est catalysée par la glutamyl phosphate désydrégénase .



- Le glutamate semi-aldéhyde précédent subit une cyclisation suivie d'une réduction pour donner la proline.



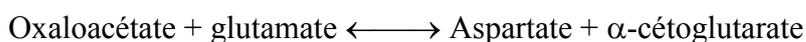
*** - **ARGININE**

L'arginine est un acide aminé indispensable cependant elle peut être formée au cours de l'uréogénèse hépatique .

--- - **FAMILLE DE L'ASPARTATE**

*** - **ASPARTATE**

L'aspartate est formé par transamination de l'oxaloacétate. Le groupement α -aminé est donné par le glutamate. La réaction est catalysée par l'**aspartate aminotransférase**



*** - **ASPARAGINE** :La synthèse est catalysée par l'**asparagine synthétase**



-- - FAMILLE DE LA SERINE :

*** - **SERINE** : La sérine est synthétisée à partir du 3-phosphoglycérate suivant la séquence ci-dessous :

- Une déshydrogénation conduit à 3-phospho-hydroxypyruvate, catalysée par la 3-**phosphoglycérate déshydrogénase**.

- Elle est suivie d'une transamination en présence du glutamate par une **phosphosérine transaminase**.

- Sous l'action d'une phosphatase on obtient la sérine par hydrolyse du groupement phosphate :

***- **GLYCOCOLLE** :Le glycolle (glycine) est synthétisé à partir de la sérine par un départ du radical -CH₂OH. La réaction est catalysée par sérine hydroxyméthyltransférase utilisant le tétrahydrofolate comme coenzyme.

*** - **CYSTEINE** :La cystéine est formée à partir de la méthionine par une séquence de réactions complexes impliquant la formation de la S-adénosylméthionine, seul cas où l'ATP est privée de ces 3 groupements phosphates dans une même réaction :

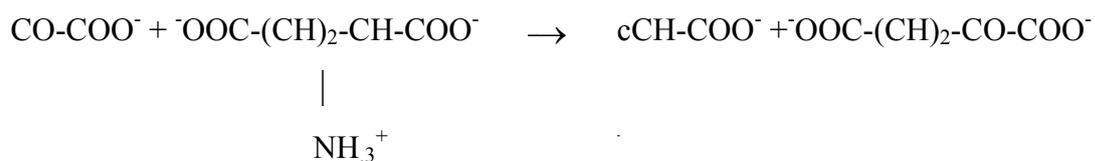


La séquence ci-dessous conduit à la cystéine (voir dégradation de la méthionine)



--- - FAMILLE DE L'ALANINE

*****Alanine** : Dans cette famille l'alanine représente le seul acide aminé non indispensable. Il s'obtient par transamination du pyruvate en présence du glutamate. La réaction est catalysée par la **glutamate pyruvate aminotransférase (GPAT)**



-- - FAMILLE DES ACIDES AMINES AROMATIQUES

*****Tyrosine** : Cet acide aminé non indispensable a la particularité de dériver de la phénylalanine (acide amine indispensable). Il est considéré comme un produit de dégradation de ce dernier. La tyrosine ou parahydroxyphénylalanine est formée au cours d'une réaction catalysée par la *phénylalanine hydroxylase*. Le pouvoir réducteur est apporté par la tétrahydrobioptérine (BH₄), l'oxygène provient de l'air :

