

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE
ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DE SCIENCE DE LA NATURE ET DE LA VIE



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biologie

Spécialité/Option : Biologie moléculaire et cellulaire / Immunologie Approfondie

Thème : Impact toxicologique des métaux lourds sur le système
antioxydant enzymatique chez les Mollusques (bivalves)

Présenté par :

BENFETTOUME Aziza

KHALLA Naima

Devant le jury composé de :

Président (e): KHALLEF Messaouda M.A. Université de Guelma

Examineur : RAMDANI Kamel M.A. Université de Guelma

Encadreur : DRIF Fafima M.C. Université de Guelma

Juin 2014

Remerciement

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos profondes
gratitudes, avant tout à Dieu le tout puissant qui nous donné le
courage pour mener à terme ce modeste travail.*

*Nous remercions de tous cœur notre présidente M^m Khallaf Messouda
d'avoir d'acceptée de présider notre travail, nous remercions M^r
Ramdani Kamel de jurer notre travail. Ainsi nous remercions de
tous nos cœur notre encadreur M^m Drif fahima pour son soutien, son
encouragement, la confiance qu'il nous témoignons en acceptant de
diriger ce travail et pour avoir mis à notre disposition ses conseils pour
une meilleure maîtrise du sujet.*

Merci à tous.

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Glossaire

Introduction.....01

Chapitre I: Métaux lourds/Mollusques (bivalves)

| | |
|---|----|
| I- Les éléments métalliques en trace..... | 03 |
| I-1 Définition..... | 03 |
| I-2 Origine et cycle des éléments traces métalliques dans le milieu naturel | 04 |
| I-3 Propriétés des éléments traces métalliques..... | 05 |
| I-3-1 Les éléments essentiels..... | 05 |
| I-3-1-1 Le zinc..... | 06 |
| I-3-1-1-1 Propriétés du zinc..... | 06 |
| I-3-1-1-2 Sources de zinc..... | 06 |
| I-3-1-1-3 Comportement du zinc..... | 07 |
| I-3-1-2 Le cuivre..... | 08 |
| I-3-1-2-1 Propriétés de cuivre..... | 08 |
| I-3-1-2-2 Sources de cuivre..... | 09 |
| I-3-1-2-3 Comportement de cuivre..... | 10 |
| I-3-2 Les éléments non essentiels..... | 10 |
| I-3-2-1 Le plomb..... | 10 |
| I-3-2-1-1 Sources de plomb..... | 11 |
| I-3-2-1-2 Comportement de plomb..... | 12 |
| I-3-2-2 Le cadmium..... | 12 |
| I-3-2-2-1 Propriétés du cadmium..... | 13 |

| | |
|--|----|
| I-3-2-2-2 Sources de cadmium..... | 13 |
| I-3-2-2-3 Comportement de cadmium..... | 14 |
| I-4 Le transfert des éléments traces métalliques dans la chaîne trophique..... | 15 |
| II- Les Mollusques (bivalves)..... | 16 |
| II-1 Classe des lamellibranches(Bivalves)..... | 18 |
| II-1-1 Classification..... | 18 |
| II-1-2 Habitat..... | 19 |
| II-1-3 Alimentation..... | 19 |
| II-1-4 Anatomie des Mollusques bivalves..... | 19 |
| II-1-4-1 Anatomie externe..... | 19 |
| II-1-4-2 Anatomie interne..... | 19 |
| II-1-5 Reproduction | 22 |
| II-2 Les bio-indicateurs de la pollution métallique..... | 25 |
| II-2-1 Les Donacidae (<i>Donax trunculus</i>)..... | 25 |
| II-2-1-1 Classification..... | 25 |
| II-2-2 Les Mytédélæ(<i>Mytilusedulis</i>)..... | 27 |
| II-2-2-1 Classification..... | 27 |
| II-3 La réponse des organismes marins aux pollutions métalliques..... | 28 |
| II-3-1 La bioaccumulation des éléments traces métalliques..... | 28 |
| II-3-2 La séquestration et élimination..... | 32 |
| II-3-2-1La métallothionéine..... | 32 |

Chapitre II : La Toxicité

| | |
|--|----|
| I- Toxicité..... | 35 |
| II- Le stress oxydant..... | 36 |
| II-1 La genèse du stress oxydant..... | 36 |
| II-2 Origine du stress oxydant..... | 37 |
| II-2-1 Déplétion en molécules anti oxydants..... | 37 |

| | |
|--|----|
| II-2-2 Les radicaux libres..... | 37 |
| II-2-2-1 Définition..... | 37 |
| II-2-2-2 Les sources de la production des radicaux libres..... | 38 |
| II-3 Les espèces réactives à l'oxygène..... | 39 |
| II3-1 L'oxygène singulet (1O_2)..... | 39 |
| II-3-2 L'anion super oxyde (O_2°)..... | 39 |
| II-3-3 Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)..... | 40 |
| II-3-4 Les radicaux hydroxyle (HO°) et alkoxyde (RO°)..... | 41 |
| II-3-5 Les radicaux peroxydes..... | 41 |
| III- Aspect fonctionels de l'immunité des mollusques bivalves..... | 42 |
| IV- Les systèmes de défenses antioxydants..... | 45 |
| IV-1 Définition..... | 45 |
| IV-2 Les systèmes antioxydants enzymatiques..... | 45 |
| IV-2-1 La super oxyde dismutase (SOD)..... | 46 |
| IV-2-2 La catalase (CAT)..... | 47 |
| IV-2-3 La glutathion peroxydase (GP_X)..... | 47 |
| V- Effet de stress sur la vie aquatique..... | 47 |
| V-1 Effet biochimiques..... | 49 |
| V-2 Effet de la toxicité métallique sur la santé humaine..... | 52 |
| V-3 Mécanisme de la toxicité..... | 53 |

Conclusion

Références bibliographiques

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des tableaux

Tableau01: Les sources naturelles du zinc dans l'environnement.....**07**

Tableau02:Les principaux radicaux libres rencontrés en biologie.....**39**

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 01 : Les types des éléments traces métalliques..... | 04 |
| Figure 02 : La chaîne alimentaire marine | 15 |
| Figure 03 :Bivalves du sérravalien (pectinidés) | 17 |
| Figure 04 :Bivalves (moules)..... | 17 |
| Figure 05 : Bivalves (huitre perle)..... | 18 |
| Figure 06 : Bivalves (palourde)..... | 18 |
| Figure 07 : Nutrition des Mollusques bivalves | 20 |
| Figure 08 : Anatomie interne et externe d'un Mollusque bivalve (moule)..... | 22 |
| Figure 09 :Cycle de vie des Mollusques bivalves..... | 24 |
| Figure 10 :L'espèce <i>Donax trunculus</i> (Linnæus, 1758)..... | 27 |
| Figure 11 :Morphologie et anatomie de <i>Mytilusedulis</i> | 29 |
| Figure 12 : Schéma, de transport, de stockage et d'élimination des métaux dans un animal aquatique..... | 34 |
| Figure 13 : La régulation de l'état redox permet le maintien de l'homéostasie cellulaire..... | 36 |
| Figure 14 : Chaîne de formation d'Espèces Oxygénées Réactives (ROS) à partir de l'oxygène..... | 42 |
| Figure 15 : Les processus de phagocytose et d'encapsulation..... | 44 |
| Figure 16 :Schéma des défenses anti oxydantes enzymatiques..... | 46 |
| Figure 17 : Mode d'action des principaux systèmes enzymatiques antioxydant et de leurs cofacteurs métalliques | 48 |
| Figure 18: Lésions de l'ADN formées par attaque radicalaire du patrimoine génétique des cellules..... | 50 |

| | |
|---|-----------|
| Figure 19 :Effets potentiels du stress oxydant sur les composants et sur l'organisme..... | 51 |
| Figure 20 : Principales physiopathologie s'accompagnant d'un stress oxydant | 52 |
| Figure 21 : Formation des radicaux libres et leurs conséquences..... | 54 |

Liste des abréviations

| | |
|--------------------------|---|
| % : | pour cent |
| $^{\circ}\text{OH}$: | radical hydroxyle |
| $\mu\text{g/l}$: | microgramme par liter |
| μl : | microlitre |
| $^1\text{O}_2$: | oxygène singulet |
| ADN: | acide désoxyribonucléique |
| BCF: | facteur de bioconcentration |
| CAT: | catalase |
| Cd: | cadmium |
| Cm: | centimètre |
| Co: | cobalt |
| Cu / Zn-SOD : | super oxyde dismutase aux anions cuivre et zinc |
| Cu: | cuivre |
| Cys : | cystéine |
| e^- : | électron |
| ETM: | élément trace métallique |
| Fe: | fer |
| g/kg : | gramme par kilogramme |
| γ : | sigma |
| GPx: | glutathion peroxydase |
| GR : | glutathion réductase |
| GSH : | glutathion réduit |
| GSSG : | glutathion oxydé |
| H_2O_2 : | peroxyde d'hydrogène |

| | |
|--------------------------------|---|
| Hg : | mercure |
| km ³ .an: | kilomètre cube par an |
| Mn: | manganèse |
| NADPH: | nicotinamide adeninephosphodinucléotide oxydase |
| NAS: | national academy of science |
| NO°: | monoxyded'azote |
| NOO° : | nitroxyde |
| O ₂ : | oxygène |
| O ₂ ^{°-} : | anion superoxyde |
| ONOO° : | peroxynitrite |
| Pb: | plomb |
| pH: | potentielhydrogène |
| PHGP _x : | phospholipide- hydro peroxyde glutathion peroxydase |
| ppm: | partie par million |
| ROO° : | radical hydroxyle |
| ROOH : | hydroperoxyde |
| ROS : | espèces réactives à l'oxygène |
| SOD: | super oxyde dismutase |
| TIA: | toxi-infection alimentaire |
| UV: | ultra-violet |
| Zn: | zinc |

Glossaire:

Toxi-infection alimentaire: est une maladie, souvent infectieuse et accidentelle, contractée à la suite de l'ingestion de nourriture ou de boisson contaminées par des agents pathogènes qu'il s'agisse de bactéries, virus, parasites ou de prions. Pour les maladies d'origine alimentaire provoquées par l'ingestion de produits non comestibles ou toxiques (médicaments, métaux lourds, champignons vénéneux, composés chimiques ou autres poisons), on parle seulement d'intoxication alimentaire.

Un xénobiotique: substance chimique introduite dans l'organisme, où elle n'est ni synthétisée ni utilisée, qui après pénétration, à une dose relativement élevée en une ou plusieurs fois très rapprochées, ou par petites doses longtemps répétées, peut provoquer immédiatement ou à terme, de façon durable ou passagère, des troubles d'une ou de plusieurs fonctions de l'organisme pouvant aller jusqu'à leur suppression complète, et entraîner la mort.

Les facteurs abiotiques: en écologie, représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème influençant sur une biocénose donnée. C'est l'action du non-vivant sur le vivant. Opposables aux facteurs biotiques, ils constituent une partie des facteurs écologiques de cet écosystème.

Les facteurs biotiques: en écologie, représentent l'ensemble des interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème. Opposables aux facteurs abiotiques, ils constituent une partie des facteurs écologiques de cet écosystème. Il s'agit des ressources alimentaires, des relations trophiques de prédation, coopération, compétition, parasitisme, ...etc.

Un protéoglycane: est une macromolécule résultant de la condensation d'une protéine avec un glycosaminoglycane (synonyme de mucoprotéine).

Les transporteurs membranaires: sont des protéines intrinsèques à la membrane cellulairé lipidique qui permettent le transport membranaire des métabolites.

Les protéines-canal: assurent un transport passif de molécules à travers la membrane. Le passage des molécules à travers un canal suit les lois de la diffusion.

Suspensivores: sont des organismes qui se nourrissent de plancton en suspension.

Le transport actif: en biologie, désigne le passage d'un ion ou d'une molécule à travers une membrane contre son gradient de concentration. Si le processus utilise de l'énergie chimique produite, par exemple, par l'hydrolyse d'un nucléotide triphosphate comme l'adénosine triphosphate, on le nomme transport actif primaire. Le transport actif secondaire implique l'utilisation d'un gradient électrochimique. On oppose le transport actif au transport passif qui n'utilise pas d'énergie.

L'endocytose: est le mécanisme de transport de molécules voire de particules (virales, bactériennes ...etc.) au sein de la cellule.

L'homéostasie: est la capacité que peut avoir un système quelconque (ouvert ou fermé) à conserver son équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes qui lui sont extérieures. Selon Walter Bradford Cannon, « l'homéostasie est l'équilibre dynamique qui nous maintient en vie ».

Un hermaphrodite: qualifie un être vivant portant les organes reproducteurs des deux sexes, mâle et femelle (un organisme hermaphrodite est encore dit bisexué ou monoïque).

Choc thermique: changement de température ; il engendre des contraintes internes dans les matériaux durs et rigides. La roche y est sensible aussi, phénomène utilisé dès la préhistoire pour rechercher les silex ou exploiter divers minerais de métaux (Dépilage par le feu dans les mines anciennes).

Hépatopancréas: est un organe qui se trouve dans le foie et le pancréas chez certains animaux invertébrés (Mollusque bivalves).

Le concept métalloïde: se rapporte à un élément chimique qui ne peut être classé ni dans les métaux ni parmi les non-métaux.

Les détroits: sont le lieu de courants parfois violents du fait des marées qui s'intensifient avec les filets d'eau qui doivent converger entre les deux côtes, comme dans les raz et les pertuis.

Non-métal: est un élément chimique qui ne possède pas les propriétés des métaux. On dit aussi "métalloïde".

La persistance: d'une substance reflète non seulement le potentiel que la substance a

d'atteindre le milieu marin et d'être transportée jusqu'à des zones éloignées mais également le potentiel d'exposition à long terme des organismes.

Les propriétés intrinsèques: de chacune des substances, surtout si elle est persistante (P), toxique (T) ou susceptible de bioaccumulation (B), déterminent le fait qu'elle tombe ou non sous le coup de la définition des substances dangereuses.

Unalliage: est la combinaison d'un élément métallique avec un ou plusieurs autres éléments chimiques.

La fertilité: désigne la capacité des personnes, des animaux ou des plantes à produire une descendance viable et abondante.

Anthropique: relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'Homme: érosion des sols, pollution par les pesticides des sols, relief des digues.

Galvanisation: est l'action de recouvrir une pièce d'une couche de zinc dans le but de la protéger contre la corrosion.

L'épandage: est une technique agricole consistant à répandre divers produits sur des zones cultivées, forêts, voies ferrées, marais (pour la démolition).

Nitrate additif anticorrosion: à large spectre, particulièrement efficace pour protéger l'aluminium et les soudures.

Les acides humiques: constituent une des fractions les plus importantes de la couche supérieure du sol, ils sont peu mobiles, mais ils sont capables de se lier plus ou moins fortement selon leur type avec d'autres corps présents dans le sol et en particulier avec l'argile.

Acide fulvique: participe aux processus vitaux. C'est un complexe de liant, ayant une charge négative. IL existe plusieurs sites d'association pour les ions métalliques, l'union de l'acide fulvique avec des groupes carboxyles aromatiques ou aliphatiques ainsi qu'à des groupes hydroxyles phénoliques.

Le potentiel redox (potentiel d'oxydo-réduction): est une grandeur empirique exprimée en volt (de symbole **V**) et notée E° (M^{n+}/M) avec (M) un métal quelconque. Ce potentiel est exprimé par rapport à une référence, souvent mesurée par une électrode normale à hydrogène (ENH), d'où l'unité **V/ENH** rencontrée dans certains ouvrages. Cette mesure est appliquée aux couples d'oxydo-réduction pour prévoir la réactivité des espèces chimiques entre elles.

La bière: est une boisson alcoolisée obtenue par fermentation de matières glucidiques végétales et d'eau.

Un antifouling (peinture antifouling ou antisalissure): est une peinture contenant des biocides destinée à empêcher les organismes aquatiques de se fixer sur la coque des navires ou sur d'autres objets immergés, comme, les hydroliennes.

Laviculture: est l'activité agricole consistant à cultiver les plantes.

Unedislocation: est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Une dislocation peut être vue simplement comme un "quantum" de déformation élémentaire au sein d'un cristal possédant un champ de contrainte à longue distance.

Lescyanures: sont les composés de l'anion CN^- , formé d'un atome de carbone lié par une liaison triple à un atome d'azote. L'ion CN^- est la base conjuguée de l'acide cyanhydrique.

Fluorure (Union fluorure F^-): est la forme ionique du **fluor**. Il s'agit d'un atome de fluor qui a gagné un électron pour avoir une couche saturée. En tant qu'**halogène**, le fluor forme un ion monovalent. Il porte une charge négative.

Bio-amplification: désigne l'augmentation cumulative, à mesure qu'on progresse dans la chaîne alimentaire (chaîne trophique), des concentrations d'une substance persistante. Se dénomme également amplification biologique ou biom-agnification. C'est le cas du plomb et surtout du mercure sous la forme méthylée. Le mercure s'accumule à chaque étape et se retrouve concentré en bout de chaîne alimentaire, notamment dans les poissons piscivores.

Les abats (reins): constituent un ensemble de produits alimentaires qui comportent tous les viscères comestibles d'animaux. Ce sont les glandes et les organes internes tel le foie, les reins, le cœur, le thymus, l'intestin.

Coquille Saint-Jacques:(nom scientifique *Pecten maximus*) est un Mollusque bivalve de la famille des Pectinidés.

Le bois énergie: est un type de bioénergie utilisant la biomasse constituée par le bois. Il s'agit essentiellement de l'utilisation du bois en tant que combustible, et dans une moindre mesure en tant que source de combustible. La combustion de cette source d'énergie peut être très polluante si les rejets ne sont pas soigneusement contrôlés. Il peut s'agir d'une énergie renouvelable si le bois est produit par une gestion durable des forêts.

Métal de transition: un élément chimique d'un bloc du tableau périodique qui n'est ni un lanthanide ni un actinide. Il s'agit des 38 éléments.

Cadmifère: cadmium, métal blanc identique au zinc.

Les produits pétroliers: sont des dérivés utilisables du pétrole brut issus de son raffinage. Contrairement aux composés pétrochimiques, qui sont des composés chimiques de base, les produits pétroliers sont des mélanges complexes. La majorité du pétrole est converti en produits pétroliers dont plusieurs types de carburants.

Rétrocontrôle: autorégulation par laquelle la variation de la sécrétion d'une **hormone** agit sur la fonction sécrétrice de la glande qui la produit, permettant un équilibre permanent.

Introduction

Introduction :

L'eau est un élément indispensable et essentiel à la vie. Cependant, il est impliqué dans toute composition et activité biologiques. Sa présence recouvre plus de 71% de la surface terrestre (**China et al., 2003**). Seulement 2,6 % de cette eau est sous forme d'eau douce. Il faut noter que moins de 1% de cette portion est accessible à la population alors que le reste est sous forme de glace (**Kadouche, 2013**). L'eau est utilisée dans la nature, d'une façon incontrôlable. De cette raison, elle est devenue de plus en plus contaminée par différents types de polluants véhiculés par les activités humaines et naturelles, tel que les métaux lourds. Ces polluants dont leurs nocivités se trouvent liée à leurs spéciations.

Les métaux lourds sont les constituants normaux de la biosphère. Leurs concentrations est en général très faibles, ce qui explique leur dénomination de « métaux traces » ou « éléments traces métalliques » (ETM). Ces éléments sont peu métabolisés. De ce faite, ils peuvent être transférés dans le réseau trophique et s'accumuler dans les corps des organismes.

Parmi ces éléments traces métalliques ont distingué les éléments essentiels. Ils jouent un rôle important dans les processus biologiques, comme exemple, le cuivre et le zinc. Ils peuvent induire des effets toxiques au-dessus d'un certain seuil. Ils peuvent être comparés à ceux qui sont causés par les éléments non essentiels. Ceux-là n'assurant aucun rôle dans les processus biologiques, ex: le plomb et le cadmium (**Rahel, 2012**).

Les éléments trace métalliques sont présents dans la croûte terrestre. L'altération et l'érosion des roches alimentent naturellement les eaux de surface. La pollution métallique des milieux aquatiques pose un problème particulier, car ils sont non biodégradables. Ils ont tendance à se concentrer dans les organismes vivants (Mollusques bivalves).

Les Mollusques bivalves, sont les premiers organismes marins cultivés, reconnus depuis longtemps comme source protéique consommable. Former d'une coquille calcifiée, qui caractérise le corps mou des Mollusques. Ces espèces filtreurs sélectionnent leurs alimentations à partir de fines particules de nourriture. Contrairement à la plupart des Mollusques qui se servent de leur radula pour se nourrir. Les bivalves sont de bons indicateurs de la pollution métallique. L'accumulation est l'un des caractères le plus intéressant chez les bivalves, est susceptible de déclencher une réaction de défense contre le stress oxydatif, qui est généré par les radicaux libres (**Medhioubi, 2011**).

Les radicaux libres sont des espèces chimiques possédant un électron non apparié. Ces radicaux libres ont des conséquences biochimiques et cellulaires importantes. Leur existence pose le problème du stress oxydant, qui ne présente pas une pathologie mais, un déséquilibre au niveau de la balance antioxydant.

Par ailleurs, les cellules ont développé des systèmes de défenses pour métaboliser les espèces oxydantes et ainsi, limiter les dégâts qu'elles provoquent. Ces systèmes antioxydants protègent les constituants cellulaires des agressions radicalaires en interagissant directement avec ces radicaux ou indirectement en synthétisant des protéines comme les métallothionéines.

Les systèmes de réparation permettent d'éliminer les dommages cellulaires produits. Cependant, d'un côté, dans la nature, il y a une production massive d'espèces oxydantes et d'un autre côté, l'inhibition de l'activité enzymatique des principaux antioxydants est localisée au niveau des cellules. Justement cette inhibition permet à favoriser une mort cellulaire excessive ou une évolution tumorale (**Haton, 2005**).

L'étude dans ce mémoire s'articule en deux chapitres.

Le premier chapitre est divisé en deux parties: La première partie a pour objectif de définir les notions d'éléments traces métalliques. Les sources et les propriétés de ces ETM, ainsi que leur mécanisme de transferts. La deuxième partie s'intéresse à un bio-indicateur, un bivalve marin, à son écologie et à son anatomie. Parmi ces mollusques bivalves, décrit dans ce travail on a le *Donax trunculus* et la moule *Mytilus edulis*.

Le deuxième chapitre contient une synthèse bibliographique identifiant des données concernant la toxicité de chaque métal étudié (Zn, Cu, Pb, Ca), leurs effets dangereux sur les milieux aquatiques et sur la santé humaine. Notre étude s'est intéressée aussi à la réponse corporelle par des mécanismes enzymatiques des antioxydants dus au stress oxydant.

Chapitre I : Les métaux lourds /Mollusques (bivalves)

I- Les éléments métalliques en traces

I-1 Définition:

Les éléments traces métalliques (ETM) appartiennent à différentes familles de substances à base de métaux ou de métalloïdes mais en faibles quantités. Leur caractéristique principale est la persistance « intrinsèque » dans le milieu car, les substances n'étant ni créées, ni dégradées dans l'environnement. Toutefois, ces mêmes substances peuvent changer de forme physique ou chimique et de valence, cela se fait sous l'influence de réactions chimiques et/ou biologiques (**Roger, 2011**).

Les éléments traces sont les 80 éléments chimiques. Ils sont les constituants de la croûte terrestre (**Baize, 1997**). Ils sont dits traces lorsque leur concentration dans le sol est inférieure à 1g/kg de matière sèche (**Gouzy et Ducos, 2008**). Certains écosystèmes sont naturellement très riches en éléments métalliques alors que d'autres le sont moins. Les éléments traces qui retiennent l'attention sont ceux qui sont toxiques pour l'Homme et l'environnement mais à faible dose. Cette liste comprend l'arsenic (Ar), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Mg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn) (**Varrault, 2012**). La plupart d'entre eux présentent la double propriété à la fois d'oligo-éléments et d'éléments toxiques, aussi bien pour le règne animal que végétal (**Doelsch, 2004**).

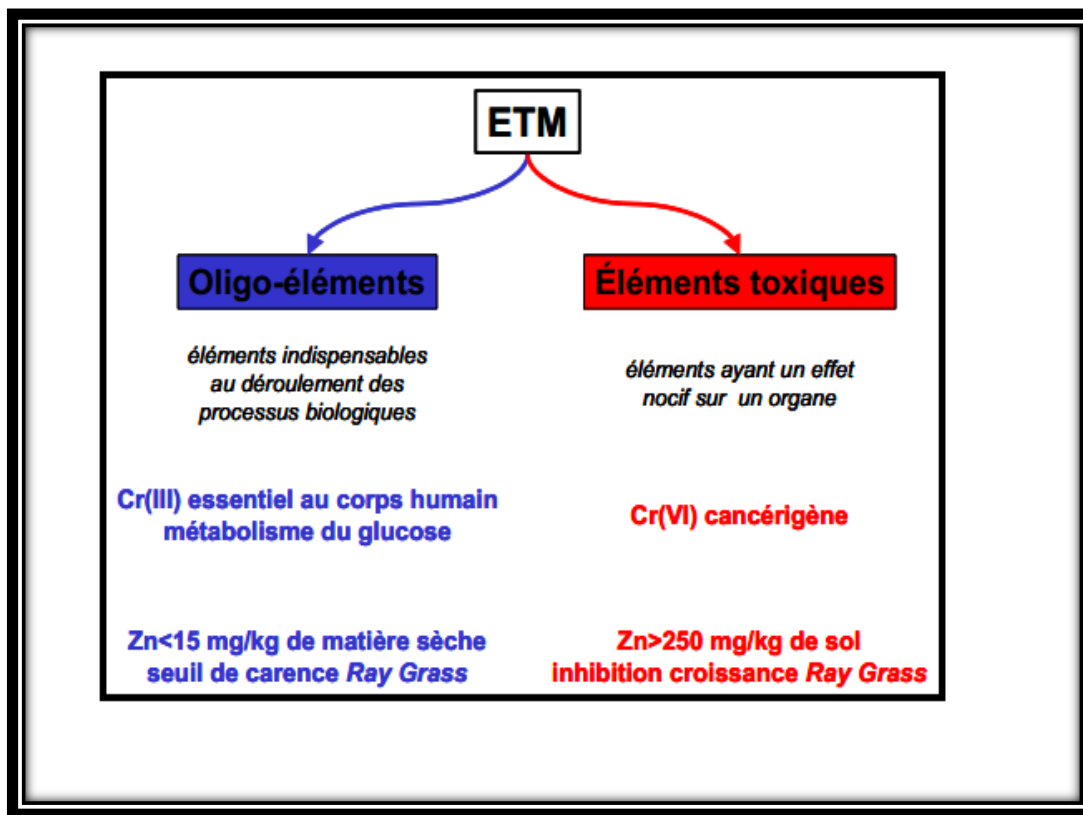


Figure 01: Les types des éléments traces métalliques (Doelsch, 2004).

I-2 Origine et cycle des éléments traces métalliques dans le milieu naturel:

Les éléments traces métalliques qui entrent en mer méditerranée sont en grande partie régis par les apports atmosphériques et les échanges à travers les détroits. Les ETMs d'origine terrestre sont principalement déposés sous forme particulaire tandis que ceux d'origine anthropique sont beaucoup plus solubles (Gouzy et Ducos, 2008). Cependant, les apports continentaux, celui des rivières et des fleuves, est estimé selon des injections d'environ 300 km³/an d'eau en mer méditerranée, dont la moitié est introduite par les 10 plus grands fleuves. Il s'agit d'une source importante de nutriments, produits chimiques et d'ETMs. En revanche, il faut noter la faible connaissance des apports d'ETM par les volcans sous-marins (Oursel, 2013).

I-3 Propriétés des éléments traces métalliques:

Certains métaux sont des éléments traces. À cette raison, le tableau périodique peut être classés en fonction de leurs caractéristiques physiques et chimiques en, éléments essentiels et non essentiels, à l'exception d'un petit nombre désigne les métalloïdes (**Habi, 2000**).

Un métal est un élément chimique issu le plus souvent d'un minerai, doté d'un éclat particulier. C'est un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, ayant des caractéristiques de dureté et de malléabilité. Le métal se combine avec d'autres éléments pour former des alliages utilisés par l'Homme depuis l'antiquité (**Rouane, 2013**). On appelle en général métaux lourds, les éléments métalliques naturels caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 g.cm^3 . Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement mais en faible quantité. Ils sont des constituants normaux de l'environnement, présents dans l'air, l'eau et le sol. Ils ont la particularité de s'accumuler dans les organismes vivants ainsi que dans la chaîne trophique (**Merzoukiet al., 2009**).

I-3-1 Les éléments essentiels :

Certains métaux lourds sont des éléments essentiels, qui sont de nature minérale. Leur présence dans l'organisme est d'un taux inférieur à 1 mg/kg de poids corporel. Pour illustrer ces faibles quantités, on dit aussi que ces éléments essentiels sont présents à l'état de trace. C'est pourquoi qu'on utilise le terme d'élément trace pour les dénommer. Ils diffèrent d'autres éléments minéraux par leur présence en quantité plus importante (de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de grammes) dans l'organisme, que l'on appelle éléments minéraux majeurs (**Rahel, 2012**). Mais, deviennent toxiques à fortes concentration. C'est le cas du fer (Fe), cuivre (Cu), zinc (Zn), cobalt (Co), manganèse (Mn)... etc (**Pichard, 2005**).

Les éléments essentiels sont ceux qui répondent aux critères fixés par **COTZIAS** :

- être présents dans les tissus vivants à une concentration relativement constante ;
- provoquer, par leur retrait de l'organisme, des anomalies structurelles et physiologiques voisines dans plusieurs espèces ;
- prévenir ou guérir ces troubles par l'apport du seul élément (**Burnol et al., 2006**).

I-3-1-1 Le zinc:

Le zinc est un composant naturel de la croûte terrestre, il est présent dans les roches, les sédiments argileux et schistes de la croûte terrestre à des concentrations de 40 à 120 mg/kg et la biosphère. C'est un élément chimique de symbole Zn et de numéro atomique 30. Il se situe dans le groupe XII du tableau périodique. Il est moyennement réactif, bon conducteur électrique, qui se combine avec l'oxygène et les éléments non métalliques tels que les acides aminés, des peptides, des protéines, et des nucléotides pour former des complexes avec quatre liaisons de coordination en disposition tétraédrique. L'état d'oxydation unique de zinc est +2 (Pichard, 2005).

I-3-1-1-1 Propriétés de zinc:

Le zinc est un élément essentiel, parmi certaines métallo-enzymes qui sont nécessaires au bon fonctionnement de tous les organes. Il intervient dans l'activité de nombreuses enzymes. Il est indispensable à un grand nombre de fonctions physiologiques vitales, dont la croissance et la multiplication cellulaire, le métabolisme osseux, la cicatrisation des blessures, la reproduction et la fertilité, l'immunité et l'inflammation, la gestation et la vision, le fonctionnement cérébral. Le zinc inclut dans la conformation de plusieurs enzymes le super oxyde dismutase (SOD) en tant qu'antioxydant. Le super oxyde dismutase contribue à neutraliser les radicaux libres (Roussel et Favier, 2009).

Le zinc est transporté en se liant à des protéines transporteurs. Son excrétion se fait à la fois par les fèces et l'urine (Poey et Philibert, 2000).

I-3-1-1-2 Sources de zinc

- **Sources naturelles:**

Le sel marin et le mouvement des particules du sol dans l'air constituent les principales émissions du zinc dans l'atmosphère. Tandis que, les incendies de forêts, et les volcans contribuent au cycle naturel du zinc. On estime ainsi que, ces émissions présentent environ 5,9 1000 T /an (Rouane, 2013).

Tableau01: Les sources naturelles du zinc dans l'environnement (**Kadouche, 2013**).

| Sources naturelles du zinc | Quantité (tonnes/année T/an) |
|---|------------------------------|
| Erosion des sols | 191500 |
| Particules du sol transportées par les vents | 19000 |
| Emission incendie | 9600 |
| Feux de forêt | 7600 |
| Emission biogéniques | 8100 |
| Pulvérisation des sels marins | 440 |
| Poussière volcanique | 35800 |

- **Sources anthropiques:**

Les apports anthropiques du zinc dans l'environnement résultent des sources minières industrielles (traitement minéral, raffinages, galvanisation du fer piles électriques, pigments matières et plastiques...etc.), des épandages agricoles et activités urbaines (trafic routier, incinération et ordure...etc.). De plus, certaines peintures antisalissure renferment des quantités importantes d'oxyde de zinc comme adjuvant anticorrosion. On estime ainsi que ces émissions anthropiques présentent 57.000 T/an (**Pichard, 2005**).

- **Sources alimentaires:**

De nombreux aliments sont riches en zinc. Parmi ces aliments on a, la viande rouge 43%, les produits laitiers 24%, les céréales, les racines et les légumes secs 23%. On le trouve aussi, dans les crustacés, les Mollusques et les coquillages...ect (**Roussel et Favier, 2009**).

I-3-1-1-3 Comportement du zinc

- **Dans l'eau:**

Le zinc dans l'eau existe sous diverses formes: ion hydraté ($Zn(H_2O)^{+2}$), complexé par les ligands organiques (acides fulviques et humiques), adsorbé sur la matière solide et oxyde de zinc ...etc. La spéciation du zinc dans les compartiments aquatiques est un phénomène très

complexe, qui dépend de nombreux facteurs abiotiques tels que le potentiel hydraté (pH), la quantité de matière organique dissoute et le potentiel redox...etc(**Pichard, 2005**).

I-3-1-2 Le cuivre:

Le cuivre est un métal naturellement présent dans l'environnement. Des concentrations élevées peuvent être trouvées près des terres agricoles, des fonderies, et près des usines de production d'engrais à base de phosphates. Il est peu réactif au contact de l'atmosphère. Cet élément s'oxyde en formant une couche protectrice de carbonate de cuivre basique, connu sous le nom « vert-de-gris » (**Falcyet al., 2013**).

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de densité 8.93g/cm^3 , son numéro atomique est 29. C'est un métal de couleur rougeâtre, extrêmement ductile et malléable, aussi bien à froid qu'à chaud, bon conducteur de l'électricité, et aussi c'est le deuxième métal non ferreux employé industriellement, derrière l'aluminium, pour ses propriétés remarquables [01].

I-3-1-2-1 Propriétés de cuivre:

Le cuivre a été considéré comme un poison dangereux, en particulier sous forme de vert-de-gris, qui est un des nombreux oxydes de cuivre (**Falcyet al., 2013**). Sachant que cet élément est nécessaire à la vie de l'être humain et des animaux. Ils ont besoin d'absorber quotidiennement quelques milligrammes de cuivre pour assurer la formation de l'hémoglobine du sang (**Cazottes, 2008**). Le cuivre a des propriétés bactéricides reconnues. Il détruit les micro-organismes et les bactéries et assainit les canalisations qui sont utilisées dans le monde entier pour la distribution d'eau, des confitures et la distillation. Ces caractéristiques confèrent au cuivre et à certains de ses alliages, comme le cupro-nickel (est un alliage de cuivre et de nickel), des propriétés anti-fouling, qui consistent à empêcher la fixation d'algues et d'organismes marins. Les sels de cuivre, comme le sulfate ou l'oxychlorure, présentent des propriétés fongicides mises à profit pour la viticulture et l'agriculture (**Burnol et al., 2006**).

I-3-1-2-2 Sources de cuivre

- **Les sources naturelles:**

Le cuivre est présent à l'état naturel dans les roches, les sédiments, les plantes, les animaux, le sol et l'air. Il est souvent présent sous forme de minéraux. Les principaux minerais de cuivre sont les sulfures, les oxydes et les carbonates (**Oursel, 2013**). Mais il est aussi abondamment utilisé dans les domaines industriels et domestiques. Il peut être détecté dans les eaux de surface, les eaux souterraines ou l'eau de mer (**Pichard, 2005**). Sa présence fait suite à l'érosion du sol ou des roches, de la dislocation du sol, ou encore à des activités anthropogéniques, telle que l'activité minière ou agricole, et les effluents provenant des usines de traitement des eaux usées [01].

- **Sources alimentaires:**

Le cuivre est un nutriment essentiel pour la vie. On le trouve dans les fruits secs, les huîtres, les chocolats, les raisins, et certains légumes comme, les haricots et les lentilles sans oublier l'eau minérale [02]. Les instances nationales et internationales ont défini des normes concernant l'apport en cuivre à des taux jugés adéquats pour conserver la santé. D'après l'organisation Nationale Académique des Sciences Américaine (NAS), les adultes consomment 0,9 mg/jour de cuivre. Tandis que, pour les femmes enceintes 1,0 mg et un taux de 1,3 mg pour les mères allaitantes. Cette organisation établie le taux maximum acceptable pour le cuivre à 10 mg/jour[03].

- **Sources anthropiques:**

Les sources anthropiques du cuivre dans l'environnement sont liées à la production, à l'utilisation ou à l'élimination du cuivre métallique (plus ou moins pur, affiné ou raffiné) et/ou des composés du cuivre et/ou des alliages du cuivre. Les apports de cuivre anthropique ont principalement pour origine: les activités industrielles qui émettent majoritairement dans les eaux et les sols [03].

I-3-1-2-3 Comportement de cuivre

- **Dans l'eau:**

La majorité du cuivre rejeté dans l'eau est sous forme particulaire et tend à se déposer, à précipiter ou à s'adsorber à la matière organique, au fer hydraté, aux oxydes de manganèse ou aux argiles. Dans l'eau, le cuivre particulaire représenterait de 40 à 90 % du cuivre. Après introduction du cuivre dans le milieu aquatique, l'équilibre chimique est généralement atteint en 24 heures [04]. Dans les milieux aqueux, le comportement du cuivre est influencé par de nombreux processus: La formation des complexes avec des ligands organiques (surtout sur les groupes $-NH_2$ et SH). L'ion Cu^+ est instable dans l'eau sauf en présence d'un ligand stabilisateur comme les sulfures, les cyanures ou les fluorures. L'ion Cu^{+2} forme de nombreux complexes stables avec des ligands minéraux comme les chlorures, l'ammonium et avec des ligands organiques (Pichard, 2005).

I-3-2 Les éléments non essentiels:

Les éléments non essentiels ou toxiques sont des micropolluants. Ils n'ont aucun rôle bénéfique connu pour la cellule. Leurs toxicités se développent par bioaccumulation le long de la chaîne alimentaire. Il est impossible de détecter la présence d'ETM dans l'eau à cause de leur faible concentration, à cette raison qu'ils sont recherchés dans les sédiments et les organismes marins (Doelsch, 2004). Parmi ses éléments on cite:

I-3-2-1 Le plomb:

Le plomb est un métal exploité depuis 5000 ans. Il est l'un des métaux toxiques présent en grande abondance dans la croûte terrestre. Il est présent dans tous les compartiments terrestres [05]. Son utilisation est directement liée à la métallurgie, l'industrie et l'imprimerie. Il est présent aussi dans les peintures et les carburants automobiles qui sont aujourd'hui à l'origine de sa large diffusion dans l'environnement (Poey et Philibert, 2000).

C'est un élément chimique de couleur gris bleuâtre, de symbole Pb et de numéro atomique 82. Il existe en quatre isotopes naturels ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb . Le plomb élémentaire a une faible conductivité électrique et sa masse élevée lui confère un important pouvoir d'absorption des rayonnements X, γ et électromagnétiques (**Garnier, 2004**).

Il fait partie des ETMs, il peut être bio-amplifié dans les systèmes biologiques, devenant un potentiel contaminant pour les différents maillons trophiques. Dans l'environnement, le flux le plus important du plomb dans l'océan provient de l'atmosphère. Le plomb apparaît être moins toxique à concentration molaire égale que le cuivre, par la formation de complexes avec les hydroxydes ou les silicates dans le milieu [01].

I-3-2-1-1 Sources du plomb

- **Sources naturelles:**

Le plomb est présent dans la croûte terrestre où sa concentration moyenne est comprise entre 10 et 20 mg/kg dans tous les compartiments de la biosphère. Dans l'air, les émissions du plomb provenant de poussières volcaniques véhiculées par le vent sont reconnues d'une importance mineure. D'autres processus naturels, comme la dégradation et l'érosion du sol et les feux de forêt, contribuent de façon significative à la libération du Pb. Mais généralement, ces processus naturels ne conduisent que rarement à des concentrations élevées du Pb dans l'environnement (**Garnier, 2004**).

- **Sources alimentaires:**

La contamination des aliments par le plomb peut provenir d'une contamination atmosphérique, et peut également provenir des techniques utilisées pour la préparation des aliments notamment pour la cuisson et la conservation. Les groupes d'aliments qui sont les vecteurs du Pb les plus importants sont le pain, les légumes, les fruits et les boissons sucrées. La portion importante de ces aliments est directement liée à la quantité ingérée de ces aliments contaminés par le plomb. Actuellement, ce sont les crustacés, les Mollusques et les abats (reins)(**Labat et Lhermitte, 2007**).

Une autre source d'exposition est celle de l'eau de boisson. La contamination des réseaux est principalement liée aux canalisations d'eau du robinet a des caractéristiques physicochimiques (faible pH, température élevée) propices à la dissolution de plomb (**Barkouche, 2007**).

La limite réglementaire de la concentration moyenne en plomb au robinet d'un consommateur, qui était fixée à 50 µg/L, a été modifiée par le décret du 20 décembre 2001 suite à la directive européenne du 3 novembre 1998. La valeur limite actuelle est de 25 µg/L et elle sera de 10 µg/L fin 2013[06].

- **Sources anthropiques:**

Le plomb est principalement utilisé dans les batteries électriques, comme additif dans les essences, dans la sidérurgie des industries de décapage et de traitement des métaux. Il est aussi utilisé dans l'incinération des déchets, dans la combustion du bois ,dans les cimenteries et les industries de fabrication des accumulateurs (**Sabouraud et al.,2009**). Dans le monde occidental, les batteries pour l'automobile présente à elles seules, 65 à 70 % des utilisations du plomb.

I-3-2-1-2 Comportement du plomb

- **Dans l'eau:**

Selon Batley et Florence (1976), environ 66% du plomb en eau de mer se trouverait sous forme de complexes organiques la biles. Ces derniers résultats sont à prendre avec la méthylation biologique du plomb par les bactéries [05]. La plupart des composés inorganiques du plomb (II) sont peu solubles dans l'eau (le cas de PbS, PbCO₃, PbSO₄), les composés halogènes du plomb (chlorure, bromure) ou les acétates de plomb étant plus solubles (**Pichard, 2003**).

I-3-2-2 Le cadmium:

Le cadmium est un métal peu répandu à l'état naturel et présent à l'état d'impuretés dans divers minerais, notamment le zinc, le plomb et le cuivre (**Rousselet, 2007**).Son nom a pour

origine *cadmia* en Latin. Il fut découvert à partir de la calamine en 1817 par le chimiste allemand Friedrich Stromeyer à Thèbes en Grèce (**Andujar et al., 2009**).

Le cadmium est un métal du groupe IIb de la famille des métaux de transition. Il possède 8 isotopes naturels. A l'état pur, il s'agit d'un métal mou, ductile et de couleur blanc-bleuâtre. Ce métal peut se sublimer à des températures relativement basses. La forme de cadmium la plus fréquemment rencontrée est l'état d'oxydoréduction+2, en particulier l'ion Cd^{+2} .

Ce cation peut s'associer à de nombreux anions pour former des sels de propriétés physiques et chimiques différentes [07].

Le cadmium n'est pas essentiel au développement des organismes animaux ou végétaux et ne participe pas au métabolisme cellulaire (**Pichard, 2005**).

I-3-2-2-1 Propriétés du cadmium:

Le cadmium est un métal de transition toxique non essentiel, indicateur de stress oxydatif (**Corine, 2008**). L'état le plus stable dans la nature est le Cd^{+2} qui permet une grande solubilité des lipides, une importante bioaccumulation et par conséquent un fort degré de toxicité qui résulte essentiellement de la ressemblance du métabolisme du Cd avec celui du Zn : le Cd remplace le Zn dans de nombreuses réactions enzymatiques (**Khalid et Brihimi, 2009**). En revanche, ses propriétés physiques et chimiques, proches de celles du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus (**Rousselet, 2007**).

I-3-2-2-2 Sources de cadmium

- **Les sources naturelles:**

Le cadmium est présent à l'état naturel dans la plupart des roches et dans la croûte terrestre à concentration moyenne de 0.2 partie par million (ppm), ainsi que dans le charbon et le pétrole. Il est généralement présent dans des minerais de zinc ou de plomb (**Brigon et Malherbe, 2005**). Il peut se constituer suite à une altération et une érosion des roches cadmifères et constituent également un produit de raffinage pour des autres métaux (Zn, Cu, Pb) (**Rousselet, 2007**).

Les apports de cadmium au milieu marin, principalement par les fleuves et les pluies, sont liés à l'industrie du zinc, à la combustion du charbon, à la sidérurgie et à la fabrication et l'utilisation des engrais phosphatés (**Burnol *et al.*, 2006**).

- **Les sources anthropiques:**

Le cadmium est très utilisé en électronique : sa forte résistance contre la corrosion et son apparence brillante lui confèrent une large utilisation dans l'industrie des automobiles, des avions, des navires, dans le domaine des constructions et des moyens de communications. Les sulfures de Cd sont utilisés comme colorants dans les diverses industries: plastiques, céramique, peintures et textiles. Le Cd est aussi un produit de base dans l'industrie des batteries, grâce à sa parfaite réversibilité lors des réactions électrochimiques sur un large intervalle de température, sa faible vitesse d'autodécharge et sa récupération facile à partir des batteries usées [06].

- **Les sources alimentaires:**

Les deux principales sources d'exposition au cadmium de la population générale sont l'alimentation et le tabagisme. Le cadmium est présent de façon importante dans certains aliments, comme les fruits de mer, les abats, certaines céréales (riz, blé...), les champignons et les légumes et, dans une moindre mesure, dans le poisson, les fruits et la viande (**Andujar *et al.*, 2009**).

Les apports moyens journaliers sont d'environ 3 à 10 µg chez l'adulte non-fumeur, le tabagisme constitue un apport important de cadmium (environ 1µg par cigarette) (**Cazottes, 2008**).

I-3-2-2-3 Comportement de cadmium

- **Dans l'eau:**

Le cadmium est un non conservatif que l'on rencontre dans le milieu aquatique sous diverses forme : dissoute, colloïdale, particulaire. Les formes dissoutes de cet élément sont les espèces libres de Cd⁺² et formés par des associations de Cd avec des composés minéraux ou

organiques (Brigon et Malherbe, 2005), et sous formes chimique : minérale ou organique. Un ensemble des propriétés physicochimique du milieu (salinité, pH...) gouvernent la transformation du Cd dans l'environnement (Burnol *et al.*, 2006).

Il est bio-accumulable et répertorié comme toxique par l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) sous ses formes sulfure et oxyde de cadmium. C'est une substance classée «dangereuse prioritaire» par la Directive Européenne 2000/60/CE (Khalid et Brihimi, 2009).

I-4 Le transfert des éléments traces métalliques dans la chaîne trophiques:

Les transferts des métaux entre les individus suivent un processus classique dits «transferts trophiques». Le polluant, présent dans les algues et les micro-organismes est ingéré par un herbivore, lui-même proie pour un carnivore, lui-même proie d'un super carnivore, animal ou être humain. Au bout de la chaîne alimentaire, le consommateur final aura bioaccumulé les formes solubles des métaux (Barkouche, 2007).

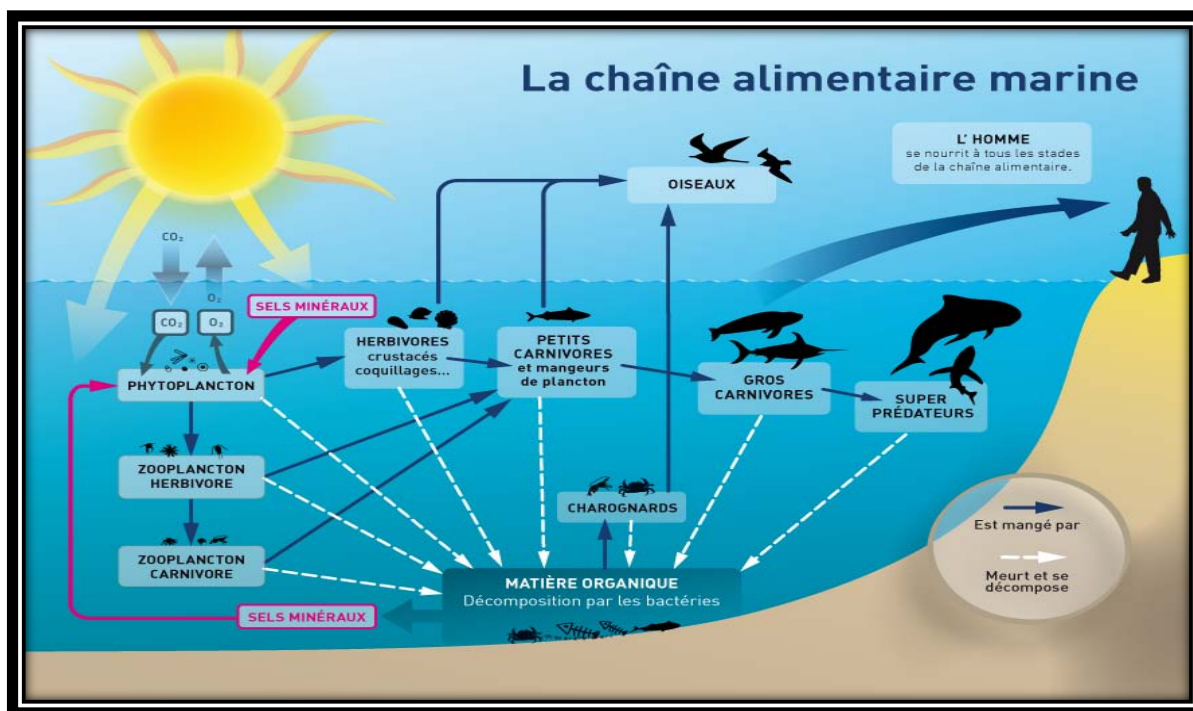


Figure 02: La chaîne alimentaire marine [08].

II- Les Mollusques Bivalves

Les Mollusques constituent l'un des grands embranchements du règne animal, avec plus de 100 000 espèces vivantes connues. On distingue actuellement huit classes: Les Caudofoveata, les Solénogastres, les Polyplacophores, les Monoplacophores, les Scaphopodes, les Gastropodes, les Céphalopodes et les Bivalve marins (**Armand et Coulet, 2013**). Ces dernières espèces possèdent un corps mou et ont des formes très variées [09]. Certains bivalves sont pourvus d'une coquille de nature calcaire et de couleur blanc opaque. Chez l'escargot, la coquille est plus développée, elle se serre pour sa protection et comme soutien pour l'ensemble du corps. Chez d'autres espèces, la coque est formée de deux valves qui recouvrent l'ensemble du corps, alors que d'autres espèces, sont totalement dépourvues de coquille externe [10].

Les produits de la mer, en particulier les Mollusques Bivalves ou fruits de mer, considérés comme des produits alimentaires, sont consommés par l'Homme soit crus soit peu cuits et peuvent provoquer dans ce cas des toxi-infections alimentaires (TIA). Il s'agit de maladies d'origine alimentaire, provoquées par l'ingestion de produits toxiques (métaux lourds) (**Myrandet al., 2007**). Ces animaux filtrent l'eau et concentrent les microorganismes et les toxines (**China et al., 2003**). Les bivalves ou (lamellibranches) forment une classe des Mollusques. Cette classe comprend notamment les Pectinidés (Fig.03), les moules (Fig.04), les huîtres (Fig.05), les palourdes (Fig.06) et de nombreuses autres familles de coquillages.

Leur corps aplati latéralement est recouvert d'une coquille calcaire carbonate de calcium constituée de deux valves d'où le nom est dérivé (**Zoran et al., 2006**). La valve présente différents critères et permet l'identification de ces espèces. Sa taille est l'une des caractères les plus importants liée à la bioaccumulation des éléments métalliques chez les bivalves (**Merzouki et al., 2009**). Ainsi que la forme (ronde ou allongée, deux valves identiques ou différentes), la couleur (blanche, grise ou autres), et les ornements (coquille lisse ou ridée, présence d'épines) [10].

L'eau chargée de particules nutritives et d'oxygène, pénètre par le siphon inhalant, et pompée par le battement des millions de petits cils des branchies en forme de lamelles. La

nourriture triée par les branchies est acheminée vers la bouche puis digérée. Les excréments seront évacués avec l'eau de respiration par le siphon exhalant, donc les Mollusques bivalves sont considérés comme des filtreurs [11].

Grâce à l'action du pied qui s'allonge et se raccourcit alternativement, il joue le rôle de squelette hydrostatique. Cette action se fait aussi en fixant l'adhérence des espèces au substrat via la coquille ou bien par le byssus sécrété par le pied. Le byssus constitué de filaments protéiques, qui se solidifie comme une colle pour adhérer l'espèce à la roche.

Les moules sont largement utilisés comme bio-indicateur de la pollution métalliques (Armand et Coulet, 2013), car ce sont d'excellents bio-accumulateurs de nombreux xénobiotiques. Les xénobiotiques sont des substances possédant des propriétés toxiques, comme les métaux. La pénétration des particules métalliques contenus dans l'eau et associées à la nourriture franchissent les branchies et la barrière cutanée, cette pénétration conduit à une bioaccumulation des éléments traces au niveau du corps. Ce transfert du milieu à l'organisme dépend, des concentrations présentes dans ces sources et l'influence de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques (Cheggoure, 1989).



Figure 03: Bivalves du Serravalien (pectinidés) [12].



Figure 04: Bivalves (moules) [13].



Figure 05: Bivalves (huître perle) [14].



Figure 06: Bivalves (palourde)[15].

II-1 Classe des lamellibranches (bivalves)

II-1-1 Classification:

La taxonomie moderne divise les bivalves en quatre sous-classes d'importance inégale.

- **Les Protobranches:** (proto: premier et branche : branchie), ce sont les plus primitif car leurs branchies sont de simples filaments qui n'interviennent pas dans la nutrition.
- **Les Eulamellibranches:** (eu: vrai, lamelli: lamelles, branche: branchie) leurs branchies forment de véritables lamelles reliées par des tissus.
- **Les Septibranches:** (septum: cloison, branche: branchie) une cloison, le septum, sépare les branchies de la cavité palléale. Ce groupe réunit les espèces qui vivent à de grande profondeur.
- **Les Filbranches:** (fil: filamenté, branche: branchie), car leurs filaments branchiaux sont reliés entre eux par des fils raides. L'intérieur de leur coquille est généralement recouvert de nacre.

Certaines familles vivent fixées (huîtres, moules, jambonneau de mer), d'autres sont libres et peuvent nager en claquant leurs valves (peigne, coquille Saint-Jacques) (Potot et Bertholon, 2001).

II-1-2 Habitat:

Les habitats naturels des huîtres se rencontrent dans les écosystèmes côtiers ouverts, des rivages rocheux et des marins vaseux. Les moules occupent différents types d'habitats, des eaux côtières peu profondes jusqu'à l'estuaire [16].

II-1-3 Alimentation:

Les Mollusques bivalves sont des suspensivores, capables de s'alimenter à partir de cellules phytoplanctoniques en suspension (Fig.07) [16]. Ils sont constitués d'un ensemble hétérogène de micro-algues unicellulaires majoritairement photosynthétiques, vivant en suspension dans l'eau et soumises aux mouvements des masses d'eau. Les cellules peuvent être solitaires ou groupées en colonies (Medhioub, 2011). Le mode de nutrition des bivalves par filtration de l'eau de mer, conduit inévitablement à leur contamination par des bactéries, des virus, des toxines et de substances chimiques toxiques présents dans leur environnement (Vidal, 2001). La dégradation des particules est possible grâce à la présence du stylet cristallin, composé de mucoprotéines, qui se projette à travers l'estomac et vient frotter contre le bouclier gastrique. Les particules sont brassées par les rotations du stylet, et subissent un début de lyse grâce à l'action des enzymes (amylase) libérées par le stylet (Medhioub, 2011).

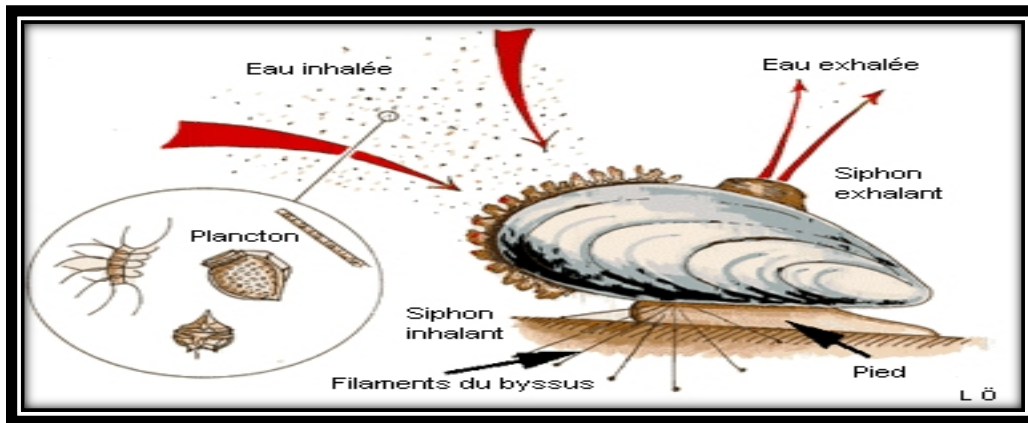


Figure 07: Nutrition des Mollusques bivalves [17].

II-1-4 Anatomie des Mollusques bivalves

II-1-4-1 Anatomie externe:

- **Les deux valves** :sont à l'origine de la formation de la coquille, qui peut être symétrique ou asymétrique [11] et peuvent couvrir la totalité ou une partie du corps mou de l'animal(Fig.08) (Vidal, 2001).
- **La charnière**: est la partie dorsale de l'animal ou les valves sont jointes (Zoran *et al.*, 2006).

II-1-4-2 Anatomie interne:

- **Le manteau**: couvre le corps mou et sécrète la coquille. Il est composé de deux valves [11].
- **Muscles adducteur**: permettent la fermeture de la coquille en cas de danger [11].
- **Ligament**: assure l'écartement passif des deux valves (Myrand *et al.* , 2007).
- **Le système respiratoire**: Composé d'une ou de plusieurs branchies qui sert à la nourriture, la respiration et la filtration (China *et al.*, 2003).

- **Le pied:** forme une masse musculeuse de rôle variable, il permet de ramper et de s'enfourer chez le couteau [11]. Chez les huîtres, le pied est rudimentaire (**Zoran et al., 2006**).
- **Le système circulatoire:** la circulation sanguine est assurée par le cœur, généralement deux chez quelques espèces. Le sang circule dans des veines, exactement dans des cavités, puis sort des sinus. Le sang des Mollusques peut transporter beaucoup plus d'oxygène que le sang des vertébrés (**Zoran et al., 2006**).
- **Le système nerveux:** est difficile à le détecté sans une préparation préalable (**Merzouki et al., 2009**).
- **Le système rénal:** il est difficile d'observer chez certains bivalves mais il est décelable chez certaines espèces comme les pectinidés. Les deux reins sont de petites tailles et de couleur brune, formant des sacs aplatis contre la partie antérieure du muscle adducteur. Les reins se vident dans la cavité du manteau à travers de larges fentes [18].
- **La bouche:** qui contient une langue sur laquelle on trouve plusieurs rangées de petites dents (la radula). Les Mollusques bivalves filtreurs ne possèdent pas de radula (fig.08) [10].

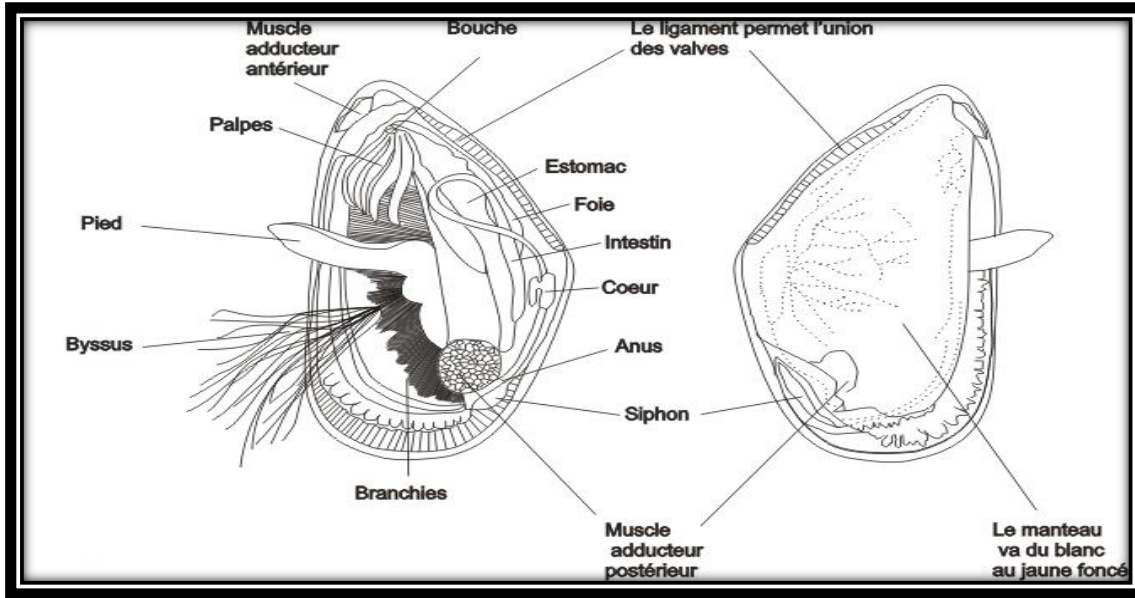


Figure 08: Anatomie interne et externe d'un Mollusque bivalve (moule) [20].

II-1-5 Reproduction:

La reproduction est uniquement sexuée. Généralement les sexes sont séparés (dioïque) ou hermaphrodites comme (monoïque). La fécondation est généralement externe [10]. La gonade peut être saillante et constitue un organe bien défini. Chez les pectinidés, les gonades occupent une portion importante de la masse viscérale (Zoran *et al.*, 2006). Les sexes peuvent être distingués à l'œil nu, quand la gonade est remplie. Cela est rendu facile grâce à sa couleur. En effet la gonade mâle est blanche, tandis que la gonade femelle elle est rouge ou orangé.

Chez la palourde la gonade n'est généralement visible qu'en saison de reproduction. Chez l'huître, elle peut occuper jusqu'à 50 % du volume corporel. Chez d'autres espèces, l'examen microscopique de la gonade est nécessaire pour déterminer le sexe de l'animal [21].

Chez certaines espèces, les mâles se développent sexuellement avant les femelles ou chez certains animaux matures, tout d'abord en tant que mâles et se transforment en femelles en grandissant.

Les gamètes (cellules reproductrices) mâles et femelles sont libérés dans l'eau. Se fusionnent pour donner un œuf qui va se développer et grandir dans l'eau (Fig.09). Les gamètes se transforment à une larve capable de nager grâce à une couronne de cils appelée le velum. Cet organe lui sert essentiellement à se nourrir de bactéries, d'algues et de microorganismes contenu dans l'eau. Après un mois de vie planctonique, le jeune bivalve va s'installer sur le fond à proximité des adultes [12].

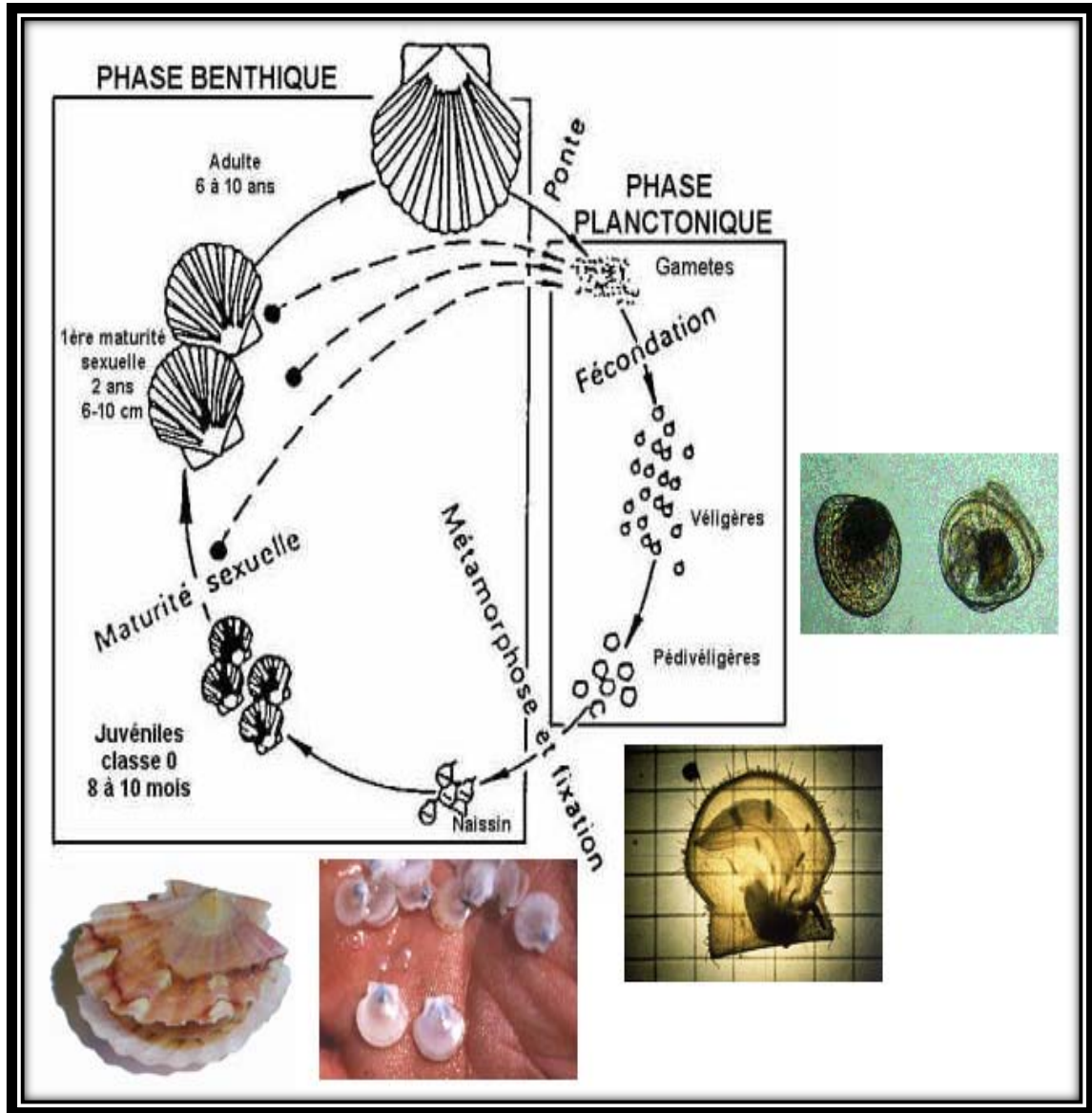


Figure 09: Cycle de vie des Mollusques bivalves [21].

II-2 Les bio-indicateurs de pollutions métalliques:

Un bio-indicateur est défini comme une espèce animale ou végétale, soit un groupe d'espèces vivantes (communauté) qui présente la particularité de révéler significativement, par sa présence, la transformation d'un écosystème donné (Régis, 2013). C'est une espèce qui doit posséder les caractéristiques d'un bio-indicateur par son abondance dans la zone d'étude facile à échantillonnée, habitant d'un site sédentaire, accumulateur de métaux trace, et surtout consommées par la population locale. Les bio-indicateurs peuvent ainsi jouer des rôles multiples. On les utilise pour détecter la pollution (Régis, 2013).

II-2-1 Les Donacidae

- *Donax trunculus*:

Il existe plusieurs espèces de Donacidae. L'une de ces espèces est le *Donax trunculus*, c'est une espèce qui est ancrée dans le sédiment à l'aide de son pied et ces siphons affleurant à la surface du sable et en contact direct avec les métaux précipités (Boussoufa *et al.*, 2007).

II-2-1-1 Classification:

Embranchement: Mollusca

Classe: Bivalvia

Sous classe: Hétérodonta

Ordre: Eulamellibranchia

Super famille: Tellinoïdea

Famille: Donacidae

Genre: *Donax*

Espèce: *trunculus*

D'après des études sur la telline *D. trunculus* (Fig.10) en Camargue, la surface externe des valves est assez brillante caractérisée par, une coquille de contour allongé triangulaire. La partie postérieure des valves est plus courte que l'intérieur. La charnière est munie de deux petites dents cardinales et des dents latérales à chaque côté des valves.

Les dimensions sont en moyenne de 36mm de largeur, 19mm de hauteur et 12,5mm de renflement. La coloration externe de la valve est violacés ou brunâtre à grisâtre. Tandis que sa coloration interne peut être entièrement blanche, jaune ou orangé [22].

La durée de vie de ce petit Mollusque est en relation avec la température moyenne de l'eau de son habitat. D'où la croissance varie proportionnellement avec la température. Sa distribution géographique s'étend des sites Atlantiques Français jusque aux côtes du Sénégal et en Mer Noir (Cooper, 2008). Sa présence en Méditerranée et largement répandue surtout dans le golfe d'Annaba (Nord-est Algérien) qui est caractérisée par une grande sensibilité pour les polluants métallique. Des études montrent que, les concentrations de métaux traces chez *D.trunculus* sont en concorde avec ceux trouvées au niveau des sédiments. Une partie des métaux essentiels tels que Zn et Cu sont connus pour jouer des rôles physiologiques dans les tissus des animaux (Belbachir et al., 2014).

L'alimentation se fait grâce à un courant d'eau créé par le Mollusque. L'eau entre par le siphon inhalant, puis est filtré par les branchies et ressort par le siphon exhalant. Ce circuit d'eau lui permet d'assurer les fonctions de nutrition, de respiration et d'excrétion. L'espèce *D. trunculus* se nourrit de matière organique et de phytoplancton en suspension (suspensivore) et absorbant le sédiment (dépositaire). Il sélectionne sa nourriture en fonction du diamètre de ces siphons (Myrand et al., 2007).

L'espèce se reproduit lorsqu'elle atteint plus de 2cm. La maturité sexuelle débute bien souvent au printemps lorsque l'eau commence à se réchauffer. Il est possible de distinguer le sexe de la masse viscérale. Chez les femelles, la gonade est présentée sous forme de poche, de couleur bleu sombre, celle des mâles est blanche. Comme tous les Mollusques, la ponte est provoquée par un stress (choc thermique ou salin). Les gamètes sont alors expulsés par le siphon exhalant. La fécondation est externe, les œufs mesurent environ 70 µm. Après une courte période de vie planctonique, la larve va se métamorphoser et adopter à une vie benthique [23].



Figure 10: L'espèce *Donax trunculus* (Linnaeus, 1758).

II-2-2 Les Mytidilae

- *Mytilus edulis* :

La moule bleue *M. edulis* est un Mollusque bivalve, appartient à de la famille des Mytilidés, très répandu sur les côtes Nord-Atlantique (fig.11) (Fernando et Amandine, 2013).

II-2-2-1 Classification:

Embranchement: Mollusca

Sous-embranchement: Conchifera

Classe: Bivalvia

Sous-classe: Pteriomorphia

Ordre: Mytiloidea

Famille: Mytilidae

Espèce: *Mytilus*

Genre: *edulis* (Linnaeus, 1758)

La moule bleue est caractérisée par une coquille équivalve ou in-équilatérale, d'une coloration bleu foncé à noire. Elle mesure de 3 à 12cm chez les adultes (**Callier, 2008**). Le corps est composé de la masse viscérale enveloppée par deux lobes du manteau, de couleur blanche, beige ou orange, avec lesquels elle fusionne au niveau de l'hépatopancréas (ou glande digestive) (**Nouailhat, 2006**). Les lobes du manteau contiennent les gonades et délimitent la cavité palléale où se trouvent les branchies en forme des lamelles. Le pied musculueux permet la locomotion occasionnelle. Les muscles adducteurs antérieurs et postérieurs maintiennent les deux valves fermées. La bouche est entourée de palpes labiaux permettant d'acheminer les particules nutritives vers la bouche (**Zoran et al., 2006**). Les branchies assurent la respiration et la nutrition (**Callier, 2008**). L'eau est aspirée et pompée grâce à la ciliature présente sur l'épithélium branchial dans la cavité palléale. Elle traverse ensuite les branchies qui la filtrent et finalement, expulsée par l'orifice exhalant.

Les moules sont considérées comme des phytophages et absorbent majoritairement du phytoplancton, mais elles consomment également des bactéries et du zooplancton (**Nouailhat, 2006**). Ce mode de nutrition par filtration, permet une accumulation de nombreux composés chimiques toxiques provenant des algues et bactéries pathogènes présent dans l'eau (**Merzouki et al., 2009**) notamment, si elle se situe dans une zone polluée. Même si ces toxines n'affectent pas les moules, leur consommation devient dangereuse et même parfois mortelle pour les humains et les mammifères généralement (**Callier, 2008**).

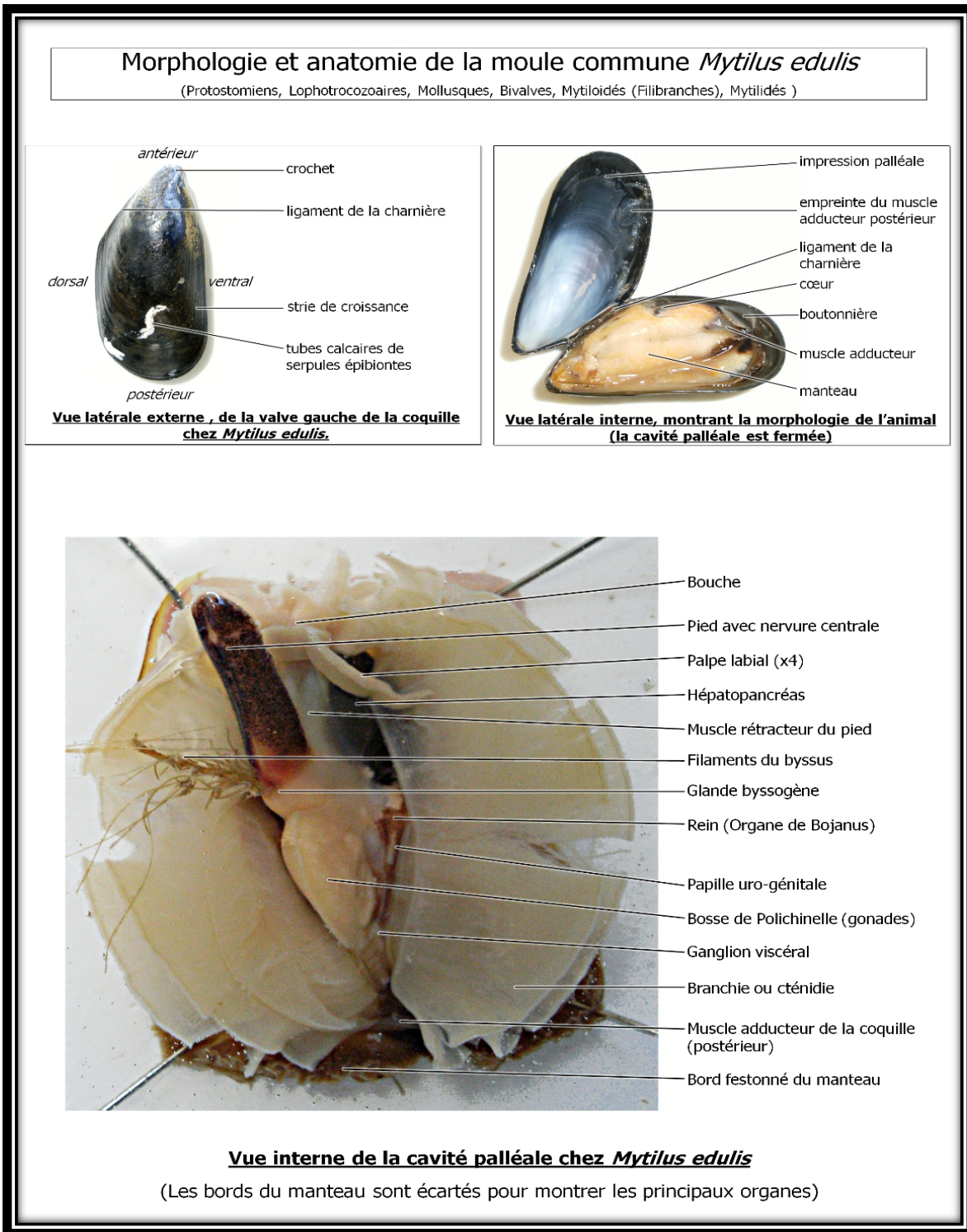


Figure 11: Morphologie et anatomie de *Mytilus edulis* [17].

II -3 La réponse des organismes marins aux éléments traces métalliques

II-3-1 La bioaccumulation: est définie par le facteur de bioconcentration BCF (rapport entre la concentration de l'élément dans les tissus de l'espèce à l'équilibre, et la concentration libre de l'élément dans l'eau). Les Mollusques accumulent les métaux lourds principalement dans deux organes: le rein et l'hépatopancréas (**Bouhaimi et al., 1997**).

La première phase d'accumulation est basée sur des phénomènes d'accessibilité, d'interaction et de pénétration à travers des barrières biologiques qui sont en contact direct avec l'environnement (**Véronique, 2005**).

Les métaux présents dans le milieu aquatique se trouvent surtout sous des formes hydrophiles et hydratées qui ne peuvent traverser les membranes biologiques par simple diffusion et qui implique des transporteurs protéiques ou canaux transmembranaires (**Zegmout et al., 2011**). Il existe quatre mécanismes de passage d'un toxique à travers une membrane cellulaire: le plus important est la diffusion passive à travers la membrane, puis la filtration à travers des pores membranaires, le transport actif et l'endocytose (**Fournier, 2005**). Certains espèces présentent une particularité mécanisme homéostatique, capables de maintenir constante la concentration de certains métaux dans leur organisme alors que la concentration extérieure augmente dans certaines limites par un mécanisme homéostatique. Donc ce phénomène sert de régulateur pour les espèces, dans une zone de concentrations située entre la déficience et la toxicité (**Bouhaimi et al., 1997**).

La bioaccumulation est due soit à un transfert direct par l'eau, soit à une désorption des éléments métalliques fixés sur les particules inertes ou vivantes en suspension dans l'eau qui leur servent de nourriture. Ainsi, constitue un outil très utile pour estimer le degré de pollution de l'hydro système (**El bekkaye et Melhaoui, 2011**).

L'accumulation du cuivre et le zinc est régulée pour de nombreuses espèces aquatiques, comme les Mollusques, les crustacés ... etc. Les entrées du Cu et du Zn se font sous forme ionique (Cu^{+2} et Zn^{+2}) par des protéines de transport membranaire. Les bivalves accumulent ces deux métaux principalement dans l'hépatopancréas, les gonades et les branchies (**Garnier, 2005**).

La pénétration du plomb dans les cellules est le résultat du transport sous forme Pb^{+2} , bien que l'endocytose dans l'épithélium branchial a été évoquée pour ce métal. Le taux d'absorption du plomb est en fonction directe à sa concentration dans le milieu marin. Dans l'organisme, les ions de Pb^{+2} entrent en compétition avec les ions de Ca^{+2} (véronique, 2005).

Les bivalves accumulent le cadmium au départ principalement dans l'hépatopancreas et dans le rein, dans les lysosomes. Cette accumulation se fait préférentiellement dans la glande digestive par rapport au manteau (Cooper, 2008).

Le transfert des ETMs du milieu à l'organisme d'épand des concentrations présentes dans ces sources et l'influence de plusieurs facteurs biotique et abiotique (Cheggoure, 1989). La bioaccumulation au niveau de l'organisme sera tributaire de nombreux facteurs, il s'agit premièrement de la nature de l'élément métallique suivant qu'il a un rôle biologique ou non et qu'il soit régulé ou pas par l'organisme (Belbachir *et al.*, 2014). La bioaccumulation dépendra aussi des facteurs biotiques: comme le stade vital, l'âge, le sexe, l'état physiologique et de plusieurs facteurs abiotiques comme: le degré de pollution, la saison. De plus, la plupart de ces facteurs interagissent ensemble et il est souvent difficile de les séparer. Ainsi au cours du cycle vital, la bioaccumulation peut subir de grandes variations (Zegmout *et al.*, 2011).

Divers familles de bivalves, les Mytilidae et les Donacidae comme la moule bleue *Mytilus edulis* et *Donax trunculus* sont reconnues comme étant des bon-indicateurs de métaux lourds et les meilleurs bio-accumulateurs de différents métaux lourds (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn) [12]. Ils sont présents dans le milieu marin à partir de trois principales formes différentes. La forme dissoute, contenue dans l'eau filtrée. La forme organique contenue dans la nourriture ingérée. Ainsi que la forme inorganique, particulaire présente en suspension dans les colonnes d'eau.

Le phénomène de bioaccumulation est maximal avant la reproduction et minimal après la ponte lorsque les réserves ont été épuisées au cours de la gamétogenèse (Bayed, 1998). Démontrant que, les concentrations de la majorité des métaux augmentent nettement en hiver et baissent en été [22]. Expriment que, c'est l'influence de nombreux rejets permanents

d'origine urbaine, industrielle et agricoles, durant l'hiver (Fournier, 2005 ; Bayed, 1998), ce qui révèle l'impact de la pollution de l'eau marin par les apports environnementaux [12].

II-3-2 La Séquestration et élimination

- **La séquestration:**

Les Mollusques bivalves peuvent, soit contrôler l'absorption du métal, soit le stocker sous forme non toxique en le complexant avec une protéine nommée la métallothionéine, capable de séquestrer les métaux (Roger, 2011), par contre les métallotnionéines n'ont aucun rôle dans la séquestration et la détoxification du Pb^{+2} (Garnier, 2005).

II-3-2-1 La Métallothionéine

- **Définition:**

Les métallothionéines (MTs) appartiennent à la famille des protéines intracellulaires, leur poids moléculaire (< 7000 Da). Cette structure moléculaire ne contiennent pas d'acides aminés aromatiques ni d'histidine. Elle est très riche en cystéine (Cys) et possède la capacité de se lier à des métaux, en particulier ceux qui régulent l'homéostasie des métaux essentiels comme le cuivre et le zinc (Latendre, 2009). Elles assureraient une tolérance aux métaux lourds chez certaines populations d'organismes aquatiques, dans un environnement peut contaminer (Hardivillier, 2005 ; Véronique, 2005). Elles ont été isolées et caractérisées pour la première fois il y a 57 ans à partir de rein de cheval (Véronique, 2005). Potentiellement présentes dans tous les organismes vivants, elles passionnent beaucoup de chercheurs en raison de leur structure chimique très particulière (Picard *et al.*, 2010).

- **Structure des métallothionéines et propriétés de séquestration des métaux:**

Le nombre et la position des cystéines des MTs sont fortement conservés d'une espèce à l'autre. Les métaux divalents sont liés aux atomes de soufre dans des amas à géométrie tétraédrique. L'affinité des métaux pour les atomes de soufre varie suivant les métaux (Nezengue, 2008). La stabilité de la liaison avec le cuivre est 100 fois plus élevée que celle avec le cadmium, elle-même 1000 fois plus forte que celle avec le zinc. Le mercure et l'argent ont une affinité pour la MT plus grande encore que le cuivre (Bigot, 2009).

- **Rôle des métallothionéines:**

La fonction la plus importante des MTs est de réguler les concentrations intracellulaires de certains métaux essentiels à l'organisme, tels que le cuivre et le zinc, en les séquestrant afin d'éviter leur circulation à l'état libre dans les tissus et leur fixation sur d'autres protéines vitales (**Achard, 2005**). La liaison covalente des métaux divalents avec les groupements thiols des MTs est dynamique puisque les métaux prisonniers peuvent être libérés à tout moment.

Les MTs assurent un rôle de protection contre les éléments métalliques, en limitant leur accessibilité à d'autres sites cellulaires, participant de cette manière à la détoxification cellulaire (**Nezengue, 2008**).

- **Elimination**

Les Mollusques bivalves éliminent les métaux par plusieurs voies: Par voie urinaire, puisque le rein a la capacité d'excréter des granules riches en métaux (**Martoja, 1998**). Par exemple, la voie d'excrétion majeure du zinc chez la moule *Mytilus edulis* est la fuite rénale sous forme granulaire et par la défécation qui permet de supprimer les métaux contenus dans le tractus digestif (**Recking, 2005**). Chez *D. trunculus*, la concentration du fer, du zinc et du l'arsenic peuvent également être excrétés à travers le byssus.

Quant aux métaux séquestrés à l'intérieur des hémocytes des Mollusques, ils sont éliminés par migration depuis les tissus intestinaux, à travers la barrière épithéliale, vers la lumière du tube digestif ou vers l'eau environnante par le mécanisme de diapédèse [**21**].

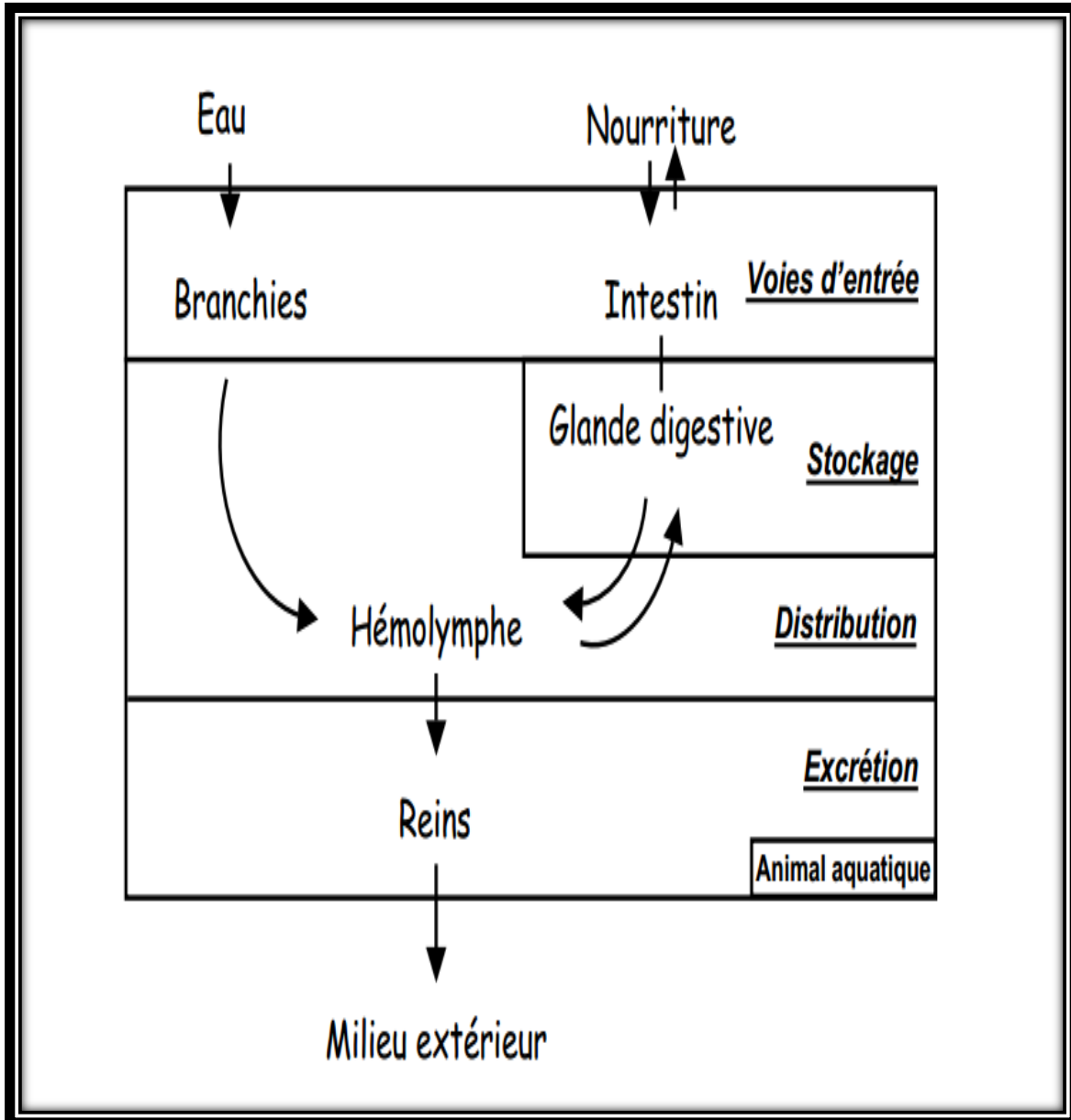




Figure12 : Schéma, de transport, de stockage et d'élimination des métaux dans un animal aquatique (Véronique, 2005)



Chapitre II : La toxicité



I- La toxicité

Introduction:

L'écotoxicologie s'est développée au début des années 1960 avec l'observation des premiers effets de la contamination chimique par les substances industrielles ou agricoles sur l'environnement (**Poisson et al., 2011**).

L'écotoxicologie est la science qui étudie le devenir des contaminants dans l'environnement, c'est-à-dire le comportement et les effets des polluants, ainsi que les conséquences biologiques et écologiques qui en découlent, à différentes échelles spatiales et temporelles. Cette discipline allie la chimie de l'environnement, la toxicologie et l'écologie. L'agent polluant est une substance naturelle ou de synthèse que l'Homme introduit dans l'environnement ou dont l'Homme modifie la répartition dans les différents compartiments de la biosphère (**Andujar et al., 2010**).

Les substances naturelles ou de synthèse, que l'Homme introduit dans un biotope donné et dont elles étaient absentes ou encore dont il modifie et augmente les teneurs lorsqu'elles sont spontanément présentes. Ces substances présentent une nocivité pour les êtres vivants en provoquant une intoxication des organismes affectés en perturbant telle ou telle fonction et pouvant entraîner la mort. On distingue deux types de toxicité la toxicité aiguë où les effets sont rapides et généralement mortels et la toxicité chronique où les effets apparaissent après une exposition prolongée à la substance, mais sont imperceptibles sur une courte échelle de temps (**Veltz-Baletre et al., 2000**).

- **La toxicité aiguë:** est provoquée par une seule exposition à une forte dose de métal lourd (par ingestion, voie respiratoire ou cutanée), de caractère plutôt accidentel. Contrairement
- **La toxicité chronique:** désigne les effets nocifs dus à une exposition répétée. Dans ce dernier cas, c'est l'accumulation de petites doses dans le corps qui provoque à long terme des effets indésirables (**Viau et Tardif, 2003**).

II- Le stress oxydant:

Le stress oxydant est un état de déséquilibre de l'organisme entre la production d'éléments oxydants et de mécanismes de défense anti oxydantes. Ce déséquilibre, provient soit d'une production exagérée d'agents oxydants, soit d'une altération des mécanismes de défense (**Cristol et al., 2005**). Le stress oxydant n'est pas une maladie mais un mécanisme physiopathologique et acceptable tel qu'il ne dépasse pas les normes (**Mercan, 2010**). En effet, tous les organismes vivants qui consomment de l'oxygène produisent des radicaux libres (**Favier, 2003**).

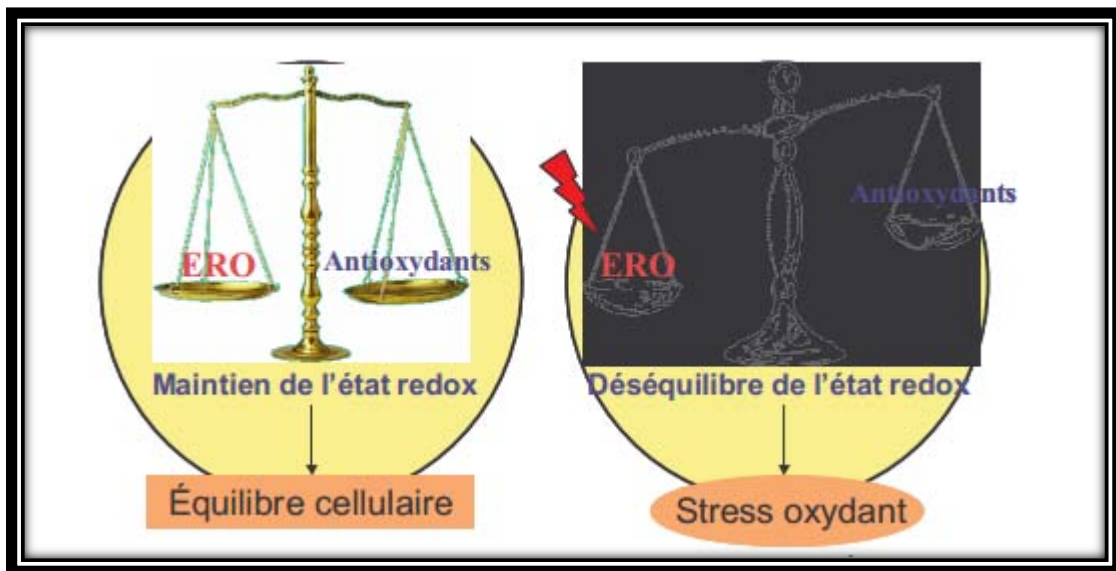


Figure 13: La régulation de l'état redox permet le maintien de l'homéostasie cellulaire (**Haton, 2005**).

II-1 La genèse de stress antioxydant:

Des situations très variées sont susceptibles d'entraîner une surproduction des espèces réactives à l'oxygène « ROS ». L'exposition à un grand nombre de substances chimiques organiques ou métalliques, a pour conséquence une formation excessive de ROS. Dans le cas des métaux de transition, leur présence accélère la formation des ROS car ils facilitent les réactions de type Haber –Weiss. Ou bien de stress abiotiques tels que les chocs thermiques l'exposition aux ultraviolets (UV) ou encore les variations de disponibilité en oxygène (**Béguel, 2012**).

II-2 Origine de stress oxydant

II-2-1 Déplétion en molécules antioxydantes:

Cette déplétion se rencontre lors de carence nutritionnelle relative ou absolue (vitamines ou oligoéléments), lors du vieillissement cellulaire et organique (**Chabaud, 2007**).

II-2-2 Les radicaux libres

II-2-2-1 Définition:

Les radicaux libres sont des molécules possédant un ou plusieurs électrons non appariés sur ses orbitales électroniques externes, la présence d'un électron célibataire confère souvent à ces molécules, une grande instabilité, elles ont en effet tendance à céder des électrons ou en arracher aux molécules environnantes pour rétablir leur stabilité (**Zazzo, 2012**). Ils peuvent être dérivés de l'oxygène (espèces réactives de l'oxygène ERO) qui sont des radicaux issus d'une réduction incomplète de l'oxygène au cours du métabolisme de l'oxygène dans l'organisme et ils sont produits d'une manière continue en très faible quantité (**Chabaud, 2007**). Leur durée de vie ne dépasse pas quelques micro fractions de secondes.

Les radicaux présentent une capacité à diffuser qui est inversement proportionnelle à leur stabilité. Les molécules très instables vont vite réagir avec les constituants du voisinage immédiat, tandis que les radicaux plus stables auront tendance à agir loin du site de production et à propager le stress oxydant (**Goudable et Favier, 1997**).

Les radicaux libres participent au fonctionnement de certaines enzymes, à la transduction de signaux cellulaires (**Ronald, 2011**), à la défense immunitaire contre les agents pathogènes, à la fécondation de l'ovule, à la régulation des gènes. Ce phénomène appelé contrôle redox des gènes (**Rees *et al.*, 2004**). Les radicaux oxygénés peuvent donc être considérés comme des messagers intra et extracellulaires. De plus, ils permettent d'induire la réponse cellulaire à de nombreux stress, xénobiotiques, permettant l'expression de gènes de défense (**Pastre, 2005**). Ainsi constituant des espèces hautement toxiques pour l'organisme, et responsables du stress oxydatif constituant des espèces hautement toxiques pour l'organisme, et responsable du stress oxydatif cellulaire. La réaction en chaîne peut illustrer la recombinaison de deux radicaux libres (**Chabaud, 2007**).



II-2-2-2 Les sources de production des radicaux libres:

Les radicaux libres sont produits par un grand nombre de mécanismes tant endogènes qu'exogènes, sans vouloir faire du finalisme. Nous pouvons considérer que certaines de ces productions sont volontairement programmées par l'organisme à des fins de défense ou d'envoi des signaux (**Gardan, 2013**). La mitochondrie est la source de production majeure de l'anion superoxyde ($O_2^{\circ-}$) dans la cellule, dans des conditions physiologique, ainsi que l'inflammation qui présente une source importante des radicaux oxygénés produit directement par le complexe enzymatique NADPH des cellules phagocytaires activées aussi des systèmes enzymatiques produisent des radicaux libres aux cours des réactions chimiques (hème oxygénase, Cytochrome P450...) et les mécanismes de cycle redox produit dans l'organisme l'oxydation des molécules comme les quinones(**Boureille et Chamoin, 2012**),les rayonnements sont par différents mécanismes des sources des radicaux tel que les ultraviolet (UV) et les rayons X et γ et surtout les métaux toxiques (Cd, Pb, Cu, Zn) mais aussi le fer libre(**Jeff, 2013**).

Tableau02: Les principaux radicaux libres rencontrés en biologie (**Haton, 2005**).

| Radical libre (nomenclature) | Structure chimique |
|------------------------------|--------------------|
| Anion su peroxyde | $O_2^{\circ-}$ |
| Radical hydroxyle | $^{\circ}OH$ |
| Oxygène singulet | 1O_2 |
| Monoxyde d'azote | NO° |
| Peroxyde d'hydrogène* | H_2O_2 |
| Nitroxyde | NOO° |
| Peroxynitrite | $ONOO^{\circ}$ |
| Radical peroxyde | ROO° |

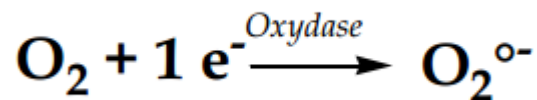
II-3 Les espèces réactives à l'oxygène

II-3-1 L'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$):

L'oxygène singulet est un agent oxydant et puissant, qui peut réagir directement avec des molécules qui souvent ne réagissent pas avec l'oxygène, telles que les acides polyinsaturés. C'est la forme active et énergétique de l'oxygène. Il peut être formé par photo activation de l'oxygène (**Rees *et al.*, 2004**).

II-3-2 L'anion super oxyde ($\text{O}_2^{\circ-}$):

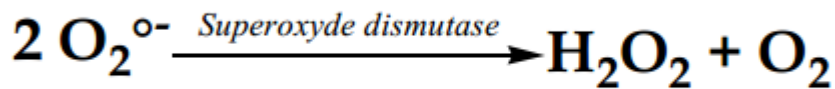
Le radical superoxyde $\text{O}_2^{\circ-}$ est le premier élément réactif de l'oxygène formé (**Lacolley, 2007**). La réduction univalente de l'oxygène moléculaire donne lieu à la formation de l'anion super oxyde ($\text{O}_2^{\circ-}$), il est chargé négativement, n'est pas très réactif. Il peut générer des radicaux réactionnels tels que le radical hydroxyle (HO°) en présence d' H_2O et des métaux. Il peut agir comme un oxydant ou un réducteur. Cependant son taux de réaction avec les lipides, l'ADN ou les protéines est assez lent (**Bonnot, 2009**). D'autre part, il peut se dismuter soit spontanément soit de manière enzymatique et mener à la formation du peroxyde d'hydrogène H_2O_2 (**Lacolley, 2007**).



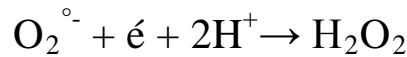
L'anion superoxyde possède une action toxique indirectement influencée, autant que précurseur d'autres radicaux libres, tel que le radical hydroxyle ($^\circ\text{OH}$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), et le peroxynitrite (ONOO°) qui possèdent des effets délétères (**Bourielle et Chamion, 2012**).

II-3-3 Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2):

L'enzyme superoxyde dismutase catalyse la dismutation de l'anion superoxyde en peroxyde d'hydrogène:



La réduction univalente de l'anion superoxyde:

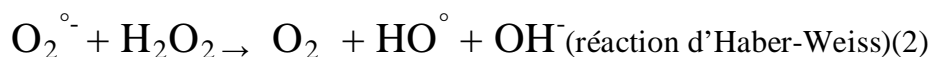


Ou la réduction bi-électroniques de l'oxygène catalysée:



réduction catalysée par des enzymes comme la glucose oxydase (Adjélé et Leyli, 2003).

L'absence de charges électriques à sa surface le rend très lipophile et peu réactif en milieu aqueux. Il peut ainsi traverser les membranes biologiques et se retrouver à une grande distance de son lieu de production. Il est impliqué comme intermédiaire dans la production de nombreux ROS, spécialement, la formation du radical hydroxyle (HO°) via l'état d'oxydation de ces éléments de transition (éq: 1). Le peroxyde d'hydrogène peut réagir avec $\text{O}_2^{\circ-}$, en présence de métaux de transition (catalyseur), pour donner le radical HO° selon la réaction de Haber-Weiss (éq: 2) (Gardan, 2013).



II-3-4 Les radicaux hydroxyle (HO°) et alkoxy (RO°):

Le radical hydroxyle HO° réagit avec tout type de molécules responsable de la peroxydation des lipides dans les membranes, de l'oxydation des protéines, de l'ADN nucléaire (Gardès et al., 2003).

Les radicaux hydroxyle (HO°) et alkoxy (RO°) proviennent respectivement de la réduction de H_2O_2 et des hydroperoxydes (ROOH). Ils sont formés par la réaction d'Haber-Weiss en présence de métaux de transition. Les radicaux hydroxyles sont les plus réactifs et les plus agressifs de tous les radicaux libres. Du fait que, le radical hydroxyle réagit dès la

première collision sur le substrat sans un apport d'énergie nécessaire à la réaction (Rees *et al.*, 2004).

II-3-5 Les radicaux peroxydes:

L'attaque des molécules biologiques (R-H), principalement les lipides (peroxydation lipidique), l'ADN et les protéines, par HO° génère des radicaux organiques (éq: 3), qui peuvent réagir avec l'oxygène pour former le radical ROO° (éq: 4). Celui-ci peut exister sous une forme protonée (ROOH), très réactive. La dégradation des hydroperoxyde peut générer des radicaux peroxydes (ROO°) et alkoxydes (RO°) (Bouaille et Chamion, 2012).

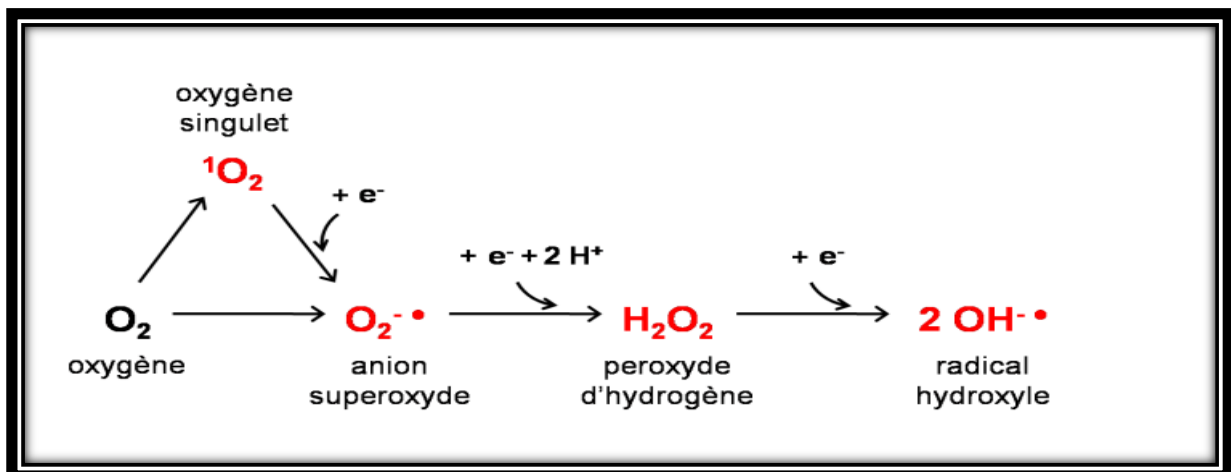
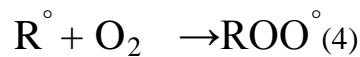
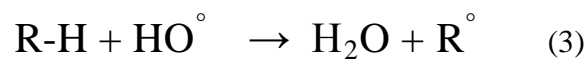


Figure 14: Chaîne de formation d'Espèces Oxygénées Réactives (ROS) à partir de l'oxygène (Favier, 2003).

III- Aspect fonctionnels de l'immunité des Mollusques bivalves:

Le système immunitaire des bivalves, comme les autres invertébrés, possède de nombreuses caractéristiques communes avec celui des invertébrés. Même s'il existe une grande diversité parmi les invertébrés, la différence primordiale est l'absence de réponse adaptative au niveau des lymphocytes B, responsable de la production d'anticorps [24]. Ainsi, les mécanismes de défense reposent sur l'immunité dite « innée » ou non-spécifique. Cette ligne de défense est principalement assurée par la coquille, le manteau, les branchies et le mucus. Leur immunité est donc basée sur la reconnaissance du non soi par les hémocytes, le type cellulaire circulant

dans l'hémolymphe « équivalant au sang » et par des processus de réponses cellulaires et humorales (**Brunetiere, 2004**). Ces différents mécanismes protègent ainsi les bivalves contre divers pathogènes présents dans l'environnement, comme les bactéries (ex: *Vibrio sp.* chez la plupart des bivalves) et les parasites nématodes (ex: *Bucephalus sp.* chez l'huître) ou protozoaire (ex: *Perkinsus marinus* chez les huîtres).

Les hémocytes sont à la base de l'ensemble de la réponse immunitaire. Elles possèdent à leurs surfaces différents types de lectine renversés dans l'hémolymphe. Les phagocytes sont ensuite activées par la formation d'un complexe (lectine-ligand). Ce ligand doit être un parasite protozoaire ou métazoaire. Il existe plusieurs sous types d'hémocytes (leucocytes agranulaires, granulaire) décrits chez différents espèces de bivalves marins (ex *Dreissena polymorpha*), menues de plusieurs fonctions spécifiques (**Glamberini, 1993**). Cette classification était faite selon des méthodes microscopiques, moléculaires et immunologiques. On distingue donc les hyalinocytes qui sont de petites cellules agranulaires avec un taux élevé nucléocytoplasmique et granulocytes qui sont de grandes cellules qui contiennent des granules cytoplasmiques acidophiles. Ces cellules sont mobiles dans l'hémolymphe et ont des capacités de phagocytose, de coagulation et de chimiotactisme. Possédant aussi, une capacité de détruire un type spécifique de bactérie, qui repose sur leur affinité pour les molécules produites par la bactérie, la présence de molécules appropriées, et la capacité de l'hémocyte à englober la bactérie. En effet, la phagocytose semble le principale mécanisme de destruction des pathogènes chez les bivalves (**Mallet et al., 2009**).

Les bivalves possèdent un arsenal de défenses humorales comme les agglutinines, les espèces réactives de l'oxygène (ROS), les peptides antimicrobiens et les lysosomes. Particulièrement, les lysozymes sont des enzymes capables de digérer la paroi des bactéries en coupant la liaison glycosidique β (1-4) des chaînes de polysaccharides. Les lysozymes des bivalves jouent un rôle autant immunitaire que digestif, qui agissent de façon complémentaire car les bactéries ingérées représentent à la fois de la nourriture et une menace infectieuse (**Brunetiere, 2004**).

Chez les bivalves, les lysozymes peuvent inhiber la croissance de bactéries pathogène en détruisant le peptidoglycane de leur paroi, et ont la propriété d'agir dans un large spectre de température.

Il existe d'autres mécanismes de réponse tels l'encapsulation et la production de nacre (bio minéralisation), mais ils ne concernent que des pathogène ou des corps étrangers trop

volumineux pour être phagocytés par un hémocyte. Plusieurs travaux ont montré l'importance des médiateurs chimiques dans le fonctionnement des cellules immunitaire chez les bivalves, comme la différenciation et la multiplication des hémocytes, ainsi que la phagocytose. Il existe une grande variété de médiateurs chimiques comme l'ACTH (corticotropinreleasing hormon), des monoamines, des glucocorticoïdes, des radicaux libres, les prostaglandines et des cytokines ...etc. Ces molécules peuvent être sécrétées par les hémocytes eux même, ce qui suggère que le processus de réaction au stress(**Garait, 2006**).

Les organismes vivants ont un système antioxydant très efficace et très diversifié pour faire face à la toxicité de l'oxygène et des espèces réactives qui en dérivent.

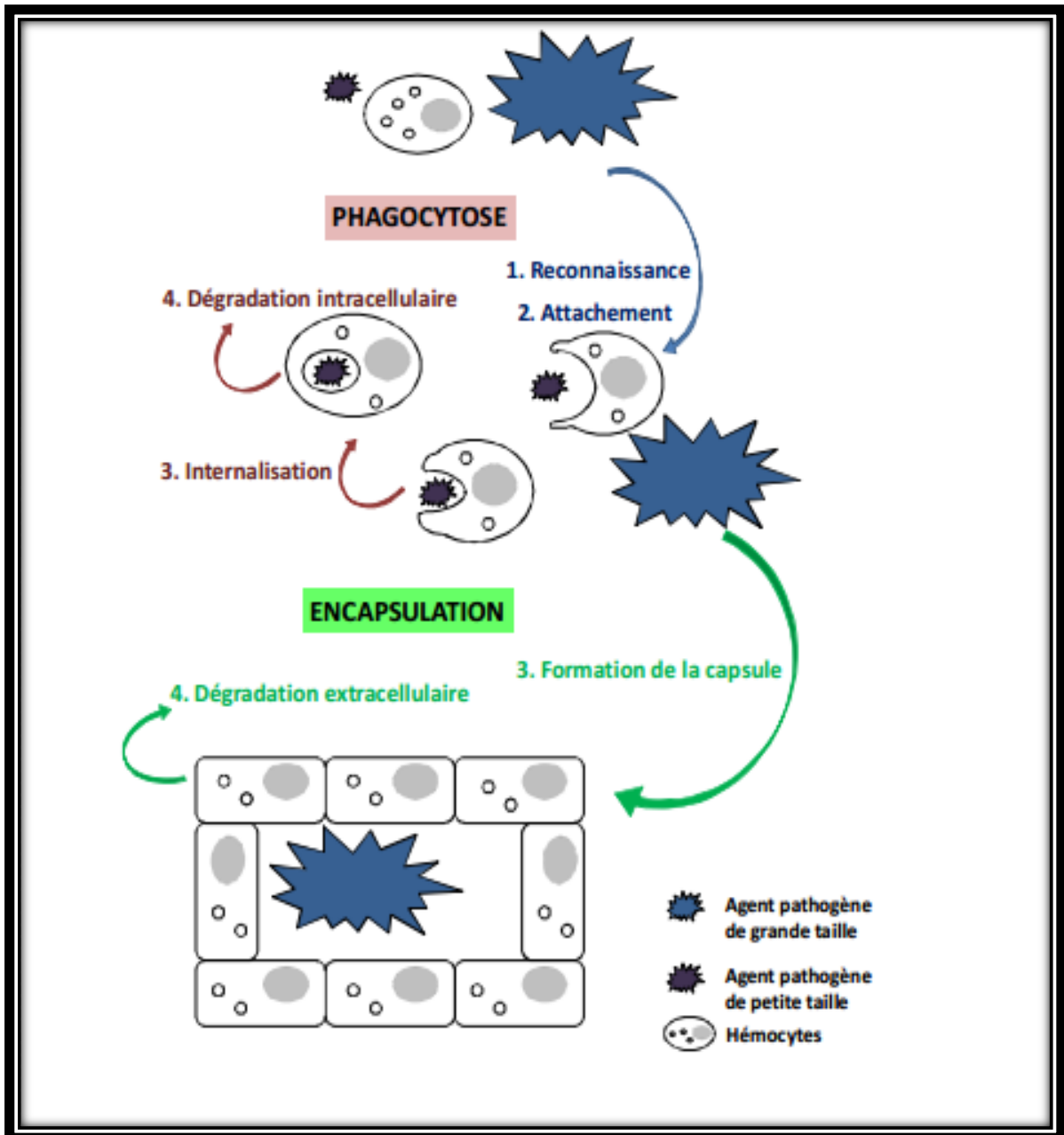


Figure 15: les processus de phagocytose et d'encapsulation (Luna, 2010).

IV- Les systèmes de défenses antioxydants:

IV-1 Définition:

Les antioxydants au sens large représentent l'ensemble des molécules susceptibles d'inhiber directement la production, de limiter la propagation ou de détruire les ERO. Ces antioxydants peuvent agir enréduisant ou en dismutant ces espèces, en les piégeant pour former un composé stable. Une fois les taux des ERO fortement baissés, les systèmes enzymatiques interviennent dans la réparation des dégâts causés par les radicaux libres (Poisson, 2013).

IV-2 Les systèmes antioxydants enzymatiques:

Il existe trois types d'enzymes antioxydants majeurs mises en évidence pour l'élimination d'espèces réactives de l'oxygène: les super oxydes dismutases (SOD), les glutathion peroxydases (GP_x) et la catalase (CAT). Ces enzymes sont toute des métalloprotéines et agissent de façon coordonnée (fig.16) (Pastre, 2005).

Les enzymes existent à l'état endogène et permettent de protéger les cellules contre les radicaux libres produits de manière physiologique au cours du métabolisme cellulaire normal. Ils sont considérés comme la première ligne de défense de l'organisme contre les ROS (Marnet, 2013).

Les enzymes anti-oxydantes nécessitent l'existence d'un métal de transition afin d'être activer en catalysant les réactions de réduction des ROS. Une déficience enélément métallique peut donc entraîner une altération des activités anti-oxydantes. En particulier, une déficience en cuivre entraîne une baisse d'activité de la Cu/Zn SOD. Cela se traduit par une plus grande sensibilité au stress oxydant (Pastre, 2005).

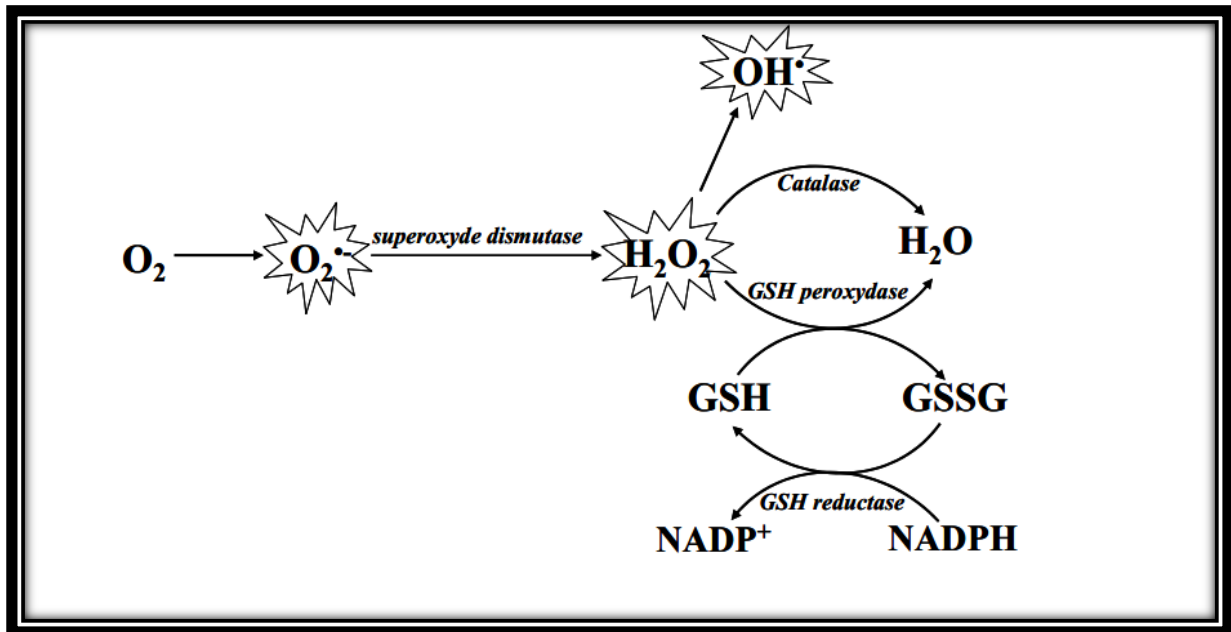


Figure 16: Schéma des défenses anti oxydantes enzymatiques (Garait, 2006).

IV-2-1 Les superoxydes dismutases (SOD):

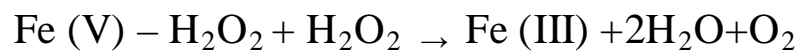
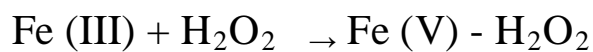
C'est un groupe de métalloenzymes retrouvées dans toutes les cellules animales et végétales qui catalyse la réaction de dismutation du radical superoxyde. Leur structure forme un puits hydrophobe au centre de la protéine, puits dans lequel se glisse l'anion superoxyde. Le mécanisme réactionnel est catalysé par un métal situé au centre de l'enzyme dont la nature distinguera un type précis (Kebieche, 2009).

Les superoxydes dismutases peuvent être inhibés par différents composés (Fe SOD) est inactivée par le peroxyde d'hydrogène, de même que la Cu/Zn SOD qui est également affectée par la présence d'autres types d'oxydants. L'inactivation de la SOD par le produit de la réaction qu'elle catalyse suggère un phénomène de rétrocontrôle, mais il semble que son interaction avec le peroxyde d'hydrogène donne lieu à la formation de radicaux hydroxyles hautement nocifs (Gardès *et al.*, 2003).

La suppression des métaux de transition par l'ajout de chélateurs dans le milieu inhibe également les SOD. Certaines substances affectent spécifiquement un type d'isoforme: le cyanure inhibe la Cu/Zn SOD et le sodium dodecyl sulfate (SDS) inhibe la Mn SOD (Brugneaux, 2004).

IV-2-2 La catalase (CAT):

La catalase (CAT) est une enzyme tétramérique contenant un groupe hème catalyseur, d'où son nom est dérivé, la réaction catalytique conduit à une décomposition du H_2O_2 en H_2O et O_2 . Cette action a été découverte début du 19^{ème} siècle (**Keibieche, 2009**). La catalase est située au niveau des peroxysomes de façon ubiquitaire dans tous les tissus. Elle est constituée d'un nombre variable selon les espèces de sous-unités d'environ 60 kDa contenant un hème, dont le fer participe à la réaction catalysée (**Cristol, 2013**). Celle-ci consiste principalement à réduire le peroxyde d'hydrogène en eau et dioxygène selon la réaction suivante:



La catalase catalyse uniquement, la peroxydation de molécules de petite taille car le ou les noyaux hémiques sont situés assez profondément dans la structure quaternaire, au bout d'un canal tapissé de groupements hydrophobes (**Rousselet, 2007**).

L'activité CAT est stimulée de façon assez claire et rapide par les contaminants générateurs de stress oxydant, ce qui en fait un biomarqueur largement utilisé (**Cristol, 2013**).

IV-2-3 La glutathion peroxydase (GP_x):

La glutathion peroxydase (GP_x) est une enzyme tétramérique permettant également la décomposition du H_2O_2 . Elle agit plus lentement que la catalase mais elle possède une meilleure affinité pour le H_2O_2 que cette dernière. La GP_x est donc essentielle à la décomposition du H_2O_2 produit de manière continue et à des niveaux physiologiques dans la cellule (**Zhao et al., 2006**).

La glutathion peroxydase (GP_x) agit en synergie avec la SOD puisque son rôle est d'accélérer la dismutation du H_2O_2 en H_2O et O_2 . Lors de cette réaction deux molécules de glutathion réduit (GSH) sont oxydées en glutathion-disulfure (GSSG) (**Salvarie et Salvarie, 2005**). Il existe également une glutathion peroxydase associée à la membrane mitochondriale, la phospholipide-hydro peroxyde glutathion peroxydase (PHGP_x) qui est spécifiquement impliquée dans la diminution de la peroxydation lipidique (**Cristol, 2013**).

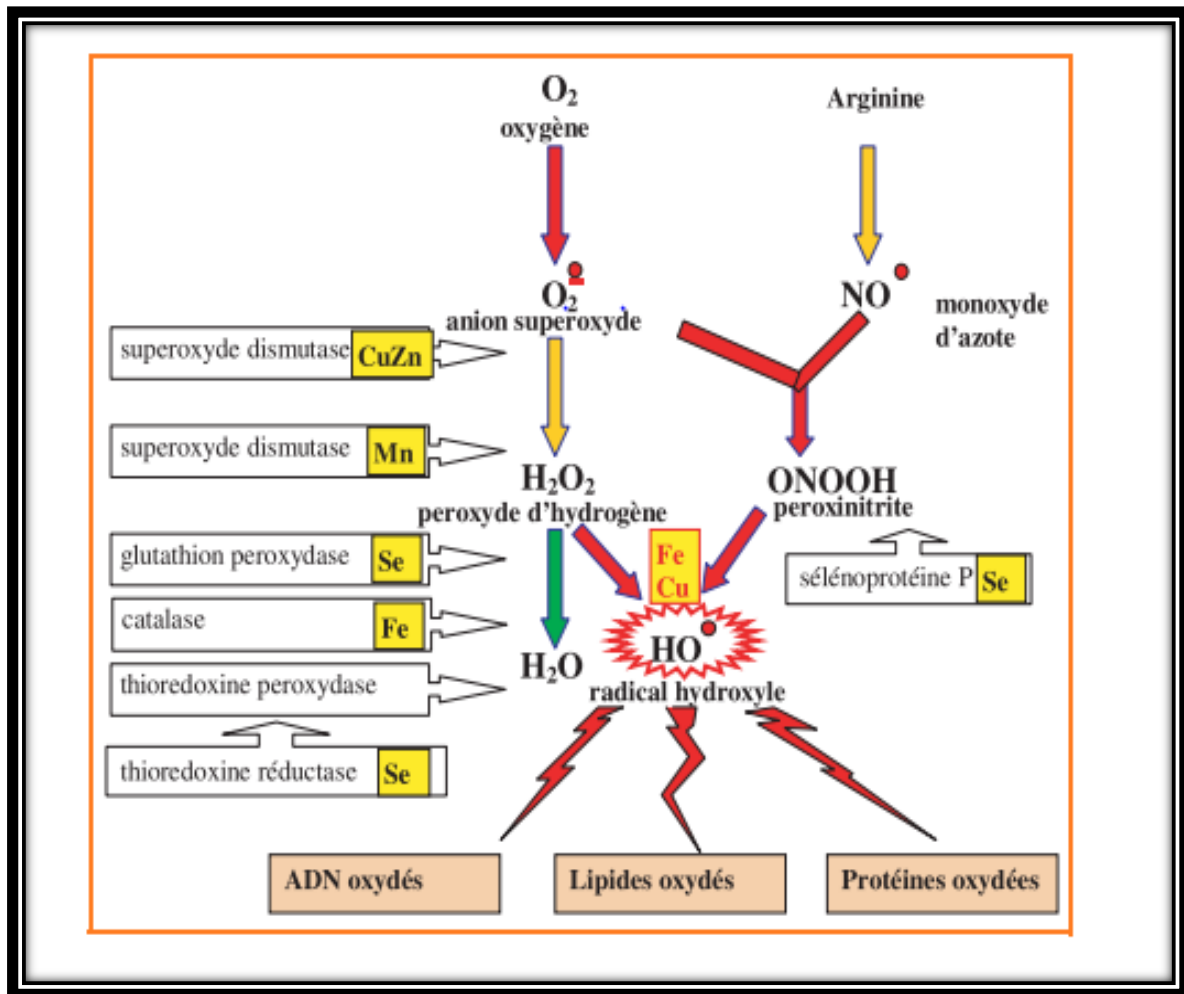


Figure 17 : Mode d'action des principaux systèmes enzymatiques antioxydant et de leurs cofacteurs métalliques (Favier, 2003).

V- Effet de stress sur la vie aquatique:

Des effets toxiques peuvent survenir lorsque ces organismes sont exposés à des niveaux de concentrations supérieurs à ceux qu'ils requièrent normalement (Hammi, 2010).

La contamination de l'environnement aquatique par des métaux peut avoir des effets toxiques aigus ou chroniques, sur la vie aquatique. A de faibles concentrations, beaucoup de métaux lourds, dont Hg, Cd, Pb, As et Cu inhibent la photosynthèse et la croissance du phytoplancton (Burnol *et al.*, 2006).

Les effets indésirables observés chez les poissons, les Mollusques et les crustacés sont manifestes notamment par un retard du développement embryonnaire, des malformations, une croissance tardive des adultes (**Zhao et al., 2006**). Des perturbations de la survie chez les quelques Mollusques bivalves endommageant la reproduction (divers types de perturbation hormonal dû à l'association des substances oestrogéniques aux métaux lourds), sur son système immunitaire (stimulation ou dépression d'immunocompétence entourée par la capacité de phagocytose d'hémocytes), ainsi que des effets cumulatifs de polluants qui se traduisent par des réponses, à l'augmentation ou à la baisse des taux de biomarqueurs de défenses (méthallothionéines, glutathion S-transférases), augmentation de l'activité enzymatique de la cyclo-oxygénase témoignant l'inflammation, peroxydation des lipides) (**Hynh, 2009**). Morphologiquement des changements apparaissent au niveau d'espèce (inhibition de la croissance adaptée à une baisse de l'indice gonado-somatique). Une plus grande dépense en énergie au niveau mitochondrial (transport d'électrons mitochondrial dans la gonade ou la glande digestive) (**Nakhlé, 2003**). Les dommages oxydatifs affectent particulièrement les lipides, les protéines et l'ADN (**Béguel, 2012**).

V-1 Effet biochimiques:

La production excessive de radicaux libres provoque des lésions directes de molécules biologiques (oxydation de l'ADN, des protéines, des lipides, des glucides) (**Favier, 2003**). D'autres anomalies biologiques sont induites par le stress oxydant: mutation, carcinogénèse, malformation des fœtus, dépôt de protéines anormales, fibrose, formation d'auto-anticorps, dépôt de lipides oxydés, immunosuppression (**Rees et al., 2004**).

- **L'ADN:** soit la mémoire de toute la composition biochimique des êtres vivants, il s'agit d'une molécule très sensible à l'attaque par les radicaux de l'oxygène. Cinq classes principales de dommages oxydatifs causés par OH^\bullet peuvent être générées: les modifications des bases nucléiques, les sites abasiques, des adduits intra-caténaires, des cassures de brins (simple et double) et des pontages ADN-protéines (Fig.18) (**Haton, 2005 ; Favier, 2003**).

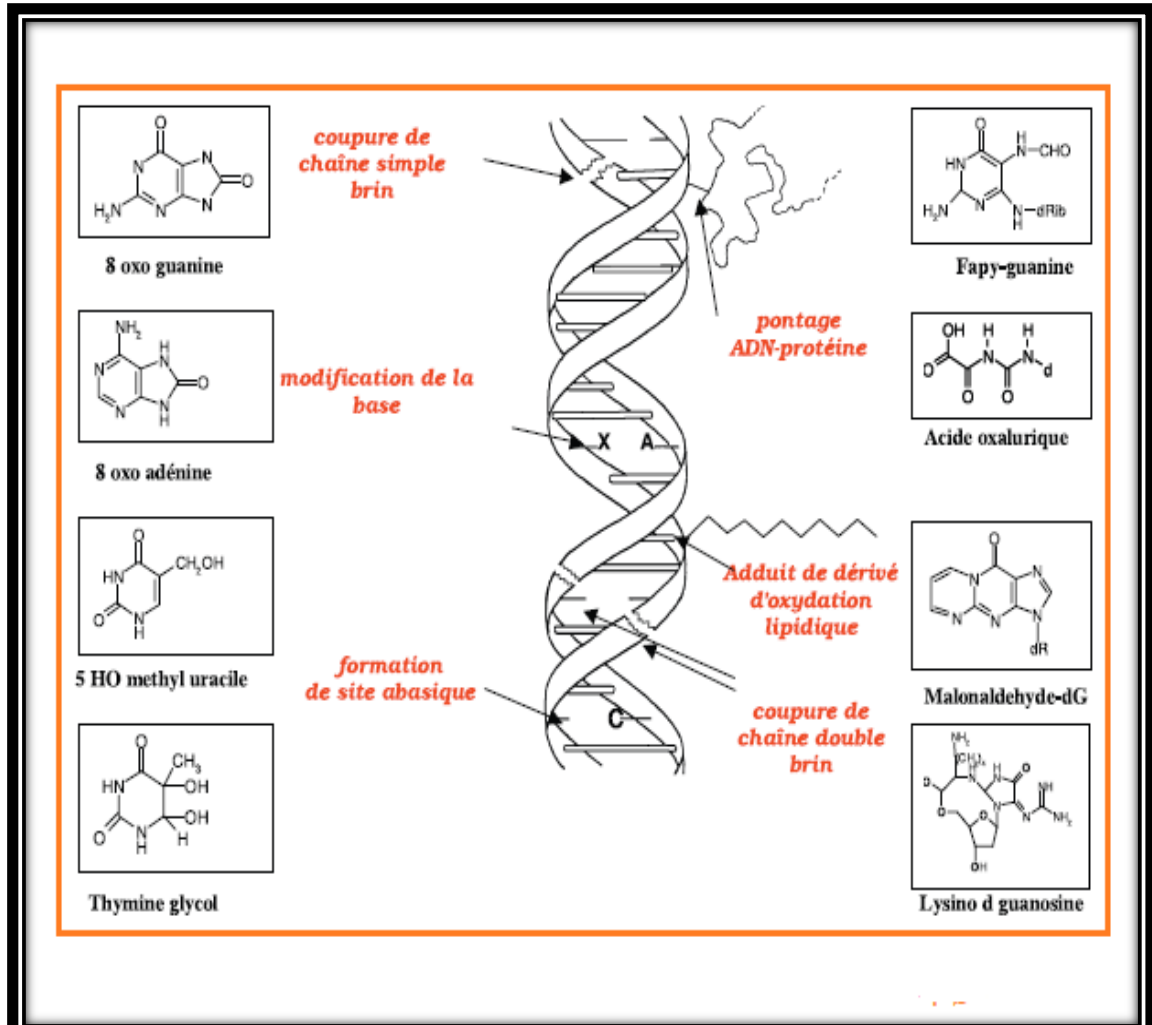


Figure 18: Lésions de l'ADN formées par attaque radicalaire du patrimoine génétique des cellules (Favier, 2003).

- **Les protéines:** les dommages oxydatifs créés au niveau des protéines entraînent des modifications de leur chaîne peptidique telles que des ruptures, l'oxydation spécifique de certains acides aminés et des altérations de charges électriques menant souvent à leur dégradation par protéolyse (Béguet, 2012). perdent leurs propriétés biologiques. Les protéines oxydées deviennent aussi très hydrophobes, soit par suppression de groupements amines ionisables, soit par extériorisation de zones hydrophobes centrales (Servais, 2004).
- **Les lipides:** la dégradation des membranes lipidiques modifie leur fluidité leur intégrité et peut entraîner leur rupture qui entraîne la mort cellulaire. Principalement, leurs

acides gras polyinsaturés sont la cible privilégiée de l'attaque par le radical hydroxyle capable d'arracher un hydrogène sur les carbones situés entre deux doubles liaisons, pour former un radical diène conjugué, oxydé en radical peroxyde. Cette attaque est appelée peroxydation lipidique. Son mécanisme comprend trois étapes: la phase d'initiation, de propagation et de terminaison (Salvarie et Salvarie, 2005).

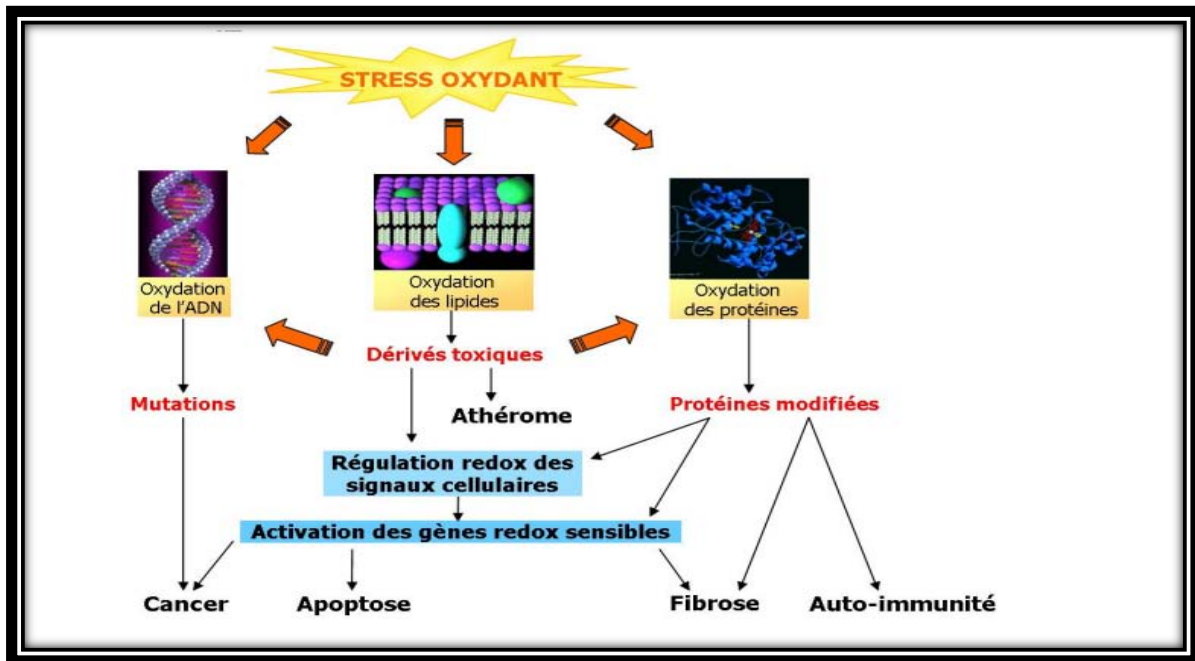


Figure 19 : Effets potentiels du stress oxydant sur les composants et sur l'organisme (Latendre, 2009).

V-2 Effets de la toxicité métallique sur la santé humaine:

La toxicité d'un métal peut être influencée par un certain nombre de facteurs. Illustre la répartition des métaux dans le corps humain. Parmi ces facteurs, on a ceux qui sont liés au contaminant (ou facteurs extrinsèques) tel que la nature du métal, spéciation chimique, organotropisme et la biodisponibilité...etc (Burnol *et al.*, 2006). Ces métaux peuvent agir en se liant à divers ligands contenant des groupements thiols ce qui peut conduire au blocage des groupes fonctionnels des molécules importantes telles que les enzymes, les polynucléotides.

Plusieurs facteurs intrinsèques tels que l'âge, le sexe, l'état nutritionnel, les conditions d'expositions et la variabilité génétique...etc., peuvent influencer sur la biodisponibilité du métal et sa distribution tissulaire (Andujaret *et al.*, 2010).

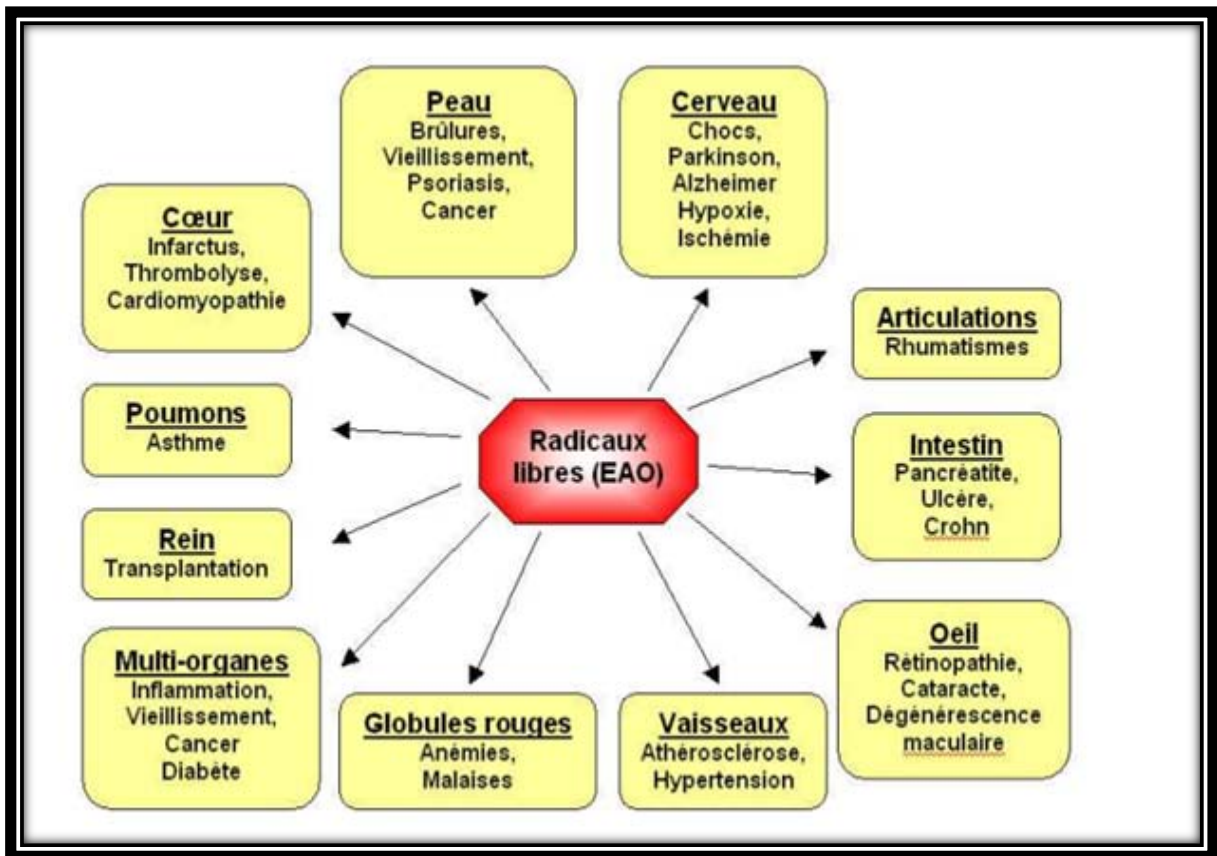


Figure 20 : Principales physiopathologie s'accompagnant d'un stress oxydant (Minig, 2009).

V-3 Mécanisme de la toxicité:

L'excès du taux de zinc est responsable de sa toxicité. La séquestration de l'excès du Zn par la mitochondrie, se traduit par un dysfonctionnement de la mitochondrie.

Le zinc en excès inhibe la glutathion réductase et peroxydase [22]. Cette inhibition se fait essentiellement par interaction du Zn avec les groupements thiols localisés dans ou proche des sites actifs. Ces observations sont confortées par d'autres résultats qui ont suggéré que l'exposition des cellules de foie à 30 μM de Zn se traduisait par une inhibition des enzymes à glutathion (GSH). Cette inhibition a pour conséquence la diminution du GSH ainsi, l'augmentation du GSSG et finalement un déséquilibre de la balance oxydative en faveur des radicaux libres. L'excès de Zn s'accompagne d'une diminution de GSH et d'un stress oxydant impliqué dans les maladies neurodégénératives [22]. Suggérant que, des taux précis de Zn peuvent induire la mort des neurones via la production des ERO. Ajoutant que, la toxicité du Zn serait liée aussi à la distribution du cuivre et du fer moléculaire.

Le taux de cuivre et du fer acheminé à travers le sang va catalyser la production des espèces réactives de l'oxygène. D'après l'étude de Walther *et al.* 1999, qui ont prouvées que 100 μM de Zn sont toxiques pour les cellules pulmonaires en culture. L'effet des doses toxiques après 2 h de temps, s'accompagne avec une diminution de la synthèse protéique et du glutathion total de 20% et d'une augmentation du glutathion oxydé (Rousselet, 2007).

Les mécanismes de toxicité sont à la fois liés au stress oxydant et aux interactions directes avec les composants cellulaires. En effet, le Cu^+ réagit avec le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) pour générer le radical hydroxyle (HO^\bullet).

Les effets toxiques du cuivre peuvent également résulter de l'affinité des ions Cu et Zn de certains facteurs de transcription qui ne peuvent plus se lier à l'ADN. Le cuivre en excès induit la modification des structures en doigts de zinc de certains facteurs de transcription d'où devient incapable de se lier à l'ADN [24].

Le Cd est capable d'induire l'apparition des espèces réactives de l'oxygène (ERO) par des mécanismes indirects. Il est également décrit comme inhibiteur de la réparation de l'ADN. Ce métal peut avoir une toxicité importante par interférence avec des métaux essentiels comme le fer, le cuivre et le zinc. Les perturbations engendrées par le Cd aboutissent à plusieurs conséquences néfastes pour la cellule (Rousselet, 2007).

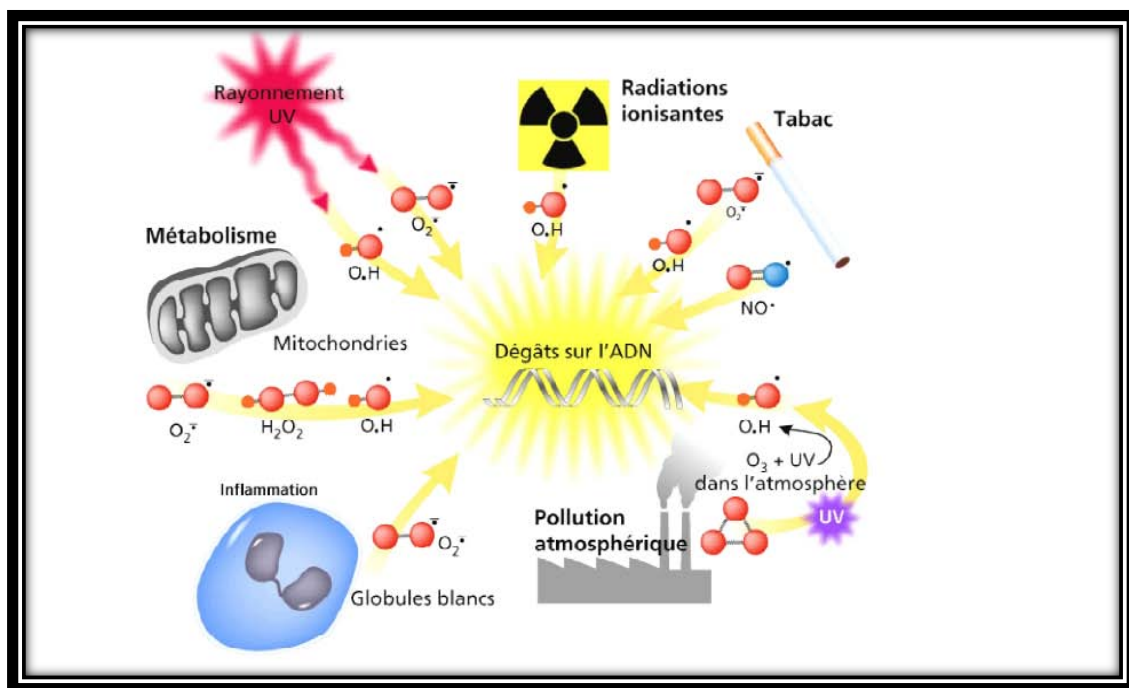


Figure 21 : Formation des radicaux libres et leurs conséquences [23].

Conclusion

Conclusion :

L'impact de la pollution sur les écosystèmes et la santé humaine est une question mondiale urgente. Parmi les polluants toxiques d'origine naturelle ou anthropique, les métaux lourds posent un sérieux problème environnemental, en particulier au niveau des écosystèmes aquatiques.

Au cours de ce travail, nous avons essayé de comprendre comment les espèces aquatiques, notamment les Mollusques bivalves, réagissent à un environnement pollué par le zinc, le cuivre, le plomb et le cadmium, en étudiant certaines de leurs réponses, face à la toxicité métallique.

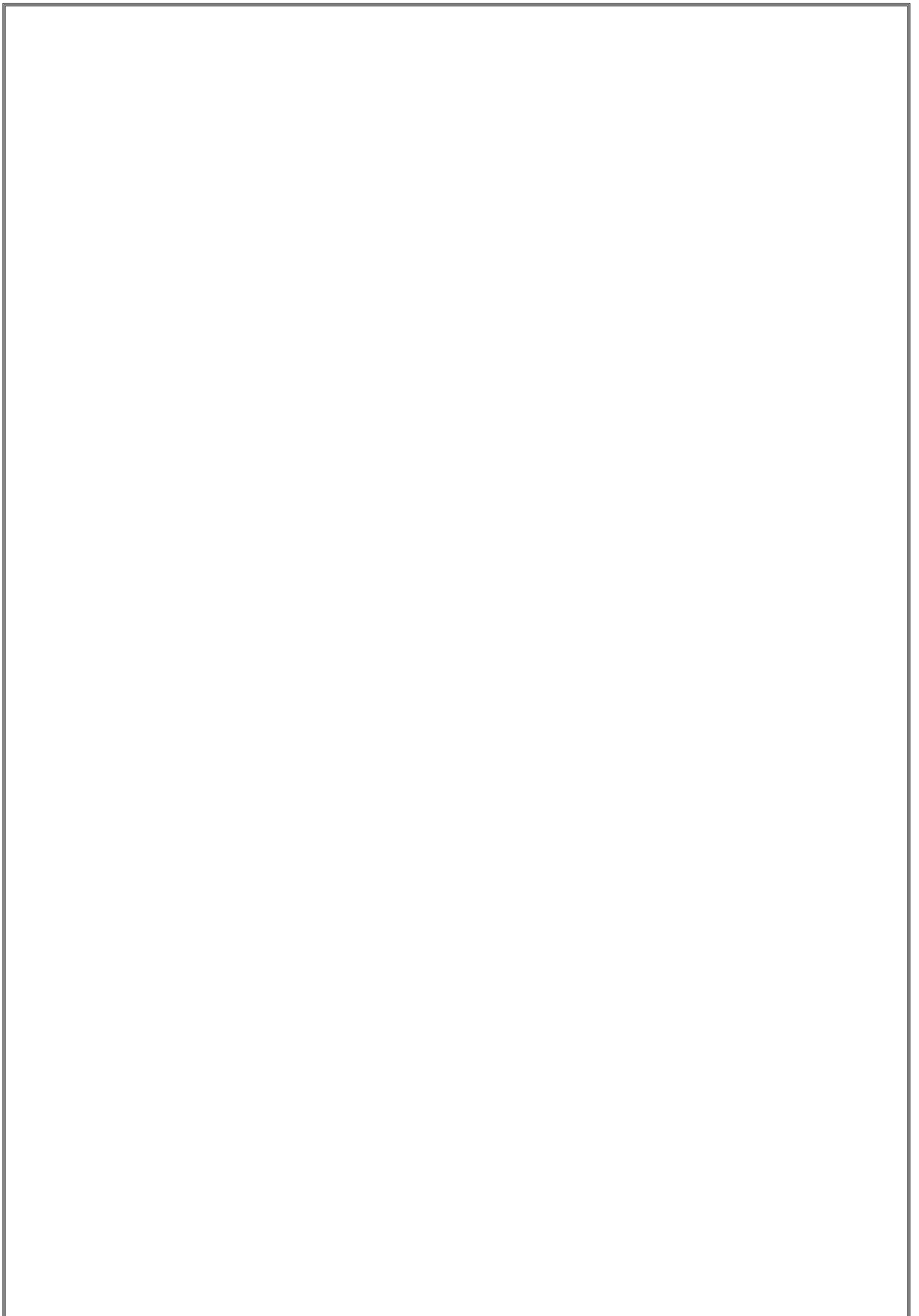
L'exposition à ces polluants, influence le stress oxydant. C'est un état de déséquilibre entre les radicaux libres et les espèces réactives à l'oxygène. Il peut être minimiser par des systèmes antioxydants qui sont en fait des systèmes de défense fréquemment impliqué lors d'une exposition des bivalves mollusques aux éléments traces métalliques.

Les métaux lourds oxydent en effet l'ADN, les lipides et les protéines et forment des produits de dégradation à forte activité radicalaire. Cette activité produit des espèces réactives à l'oxygène (ROS). Dans le cas d'un bon fonctionnement de l'organisme, les ROS sont des produits essentiels. L'équilibre est pour avoir des ROS en quantité nécessaire au bon fonctionnement cellulaire et non en excès pour ne pas trop oxyder est maintenir au sein de la cellule des systèmes d'élimination des ROS.

L'Homme se trouve au sommet de la chaîne alimentaire, leurs teneurs en métaux lourds toxiques (Cd et Pb) sont déterminées dans le sang des humains où la population consomment des aliments contaminés (mollusques bivalves). C'est l'un des causes de stress oxydant chez l'Homme. Le stress potentialise l'apparition de maladies plurifactorielles (diabète, Alzheimer, etc.) et est la cause principale de nombreuses maladies souvent liées au vieillissement (cancer, cataracte etc.).

Enfin, il est souhaitable de compléter cette étude par d'autres qui permettront de vérifier l'action de certains ions sur la circonstance de la vie aquatique.

Bibliographie



Bibliographie :

A

ACHARD-JORISM. Etudes biochimiques et génétiques de la réponse adaptative de mollusques face aux contaminations métalliques et au stress oxydant [En ligne]. Th. Doct. : Université Bordeaux 1, 2005, 254p. Disponible sur : http://grenet.drimm.ubordeaux1.fr/pdf/2005/ACHARD-JORIS_MAUD_2005.pdf [Consulté le : 08-05-2014].

ADJELEW., LEYLIS. Les Radicaux Libres: Une question d'équilibre [En ligne]. 2003. Disponible sur : <http://awiziweb.free.fr/RL.pdf> [Consulté le 06-05-2014].

ANDUJAR P., ANDUJAR L., BENSEFA A., DESCATH A. Intoxication aiguë et chronique au cadmium [En ligne]. 2010, 31, 107–115. Disponible sur : <http://www.em-consulte.com/article/242621/article/intoxication-aigue-et-chronique-au-cadmium>. [Consulté le 09-05-2014].

ARMAND S., COULETC. Etude sur la moule commune, *Mytilusedulis* [En ligne]. 1^{ère} partie, 2013, 150p, vendu par Librairie M'Lire. Disponible sur : https://accounts.google.com/Login?hl=fr&continue=http://scholar.google.com/scholar%3Fq%3DArmand%2BSabatier%2Bet%2BCoulet%2BC.%2BEtude%2Bsur%2Bla%2Bmoule%2Bcommune,%2BMytilus%2Bedulis.%26btnG%3D%26hl%3Dfr%26as_sdt%3D0,5&service=citations<mpl=scholarlibrary. [Consulté le : 11-05-2014].

B

BAIZE D. Les éléments traces métalliques (ETM) dans les SOLS [En ligne]. 1998. Disponible sur : <http://www.denis-baize.fr/documents/POITIERS-Chap.1-Generalites.pdf> [Consulté le 15-04-2014].

BARKOUCH Y. Etude du transfert des éléments traces métalliques (Al, Cd, Cu, Pb, Se et Zn) dans une chaîne alimentaire d'une zone minière de la région de Marrakech – Maroc [En ligne]. Th. doct. : Université de Nantes, 2007, 258p. Disponible sur : <http://archive.bu.univ-nantes.fr/pollux/show.action?id=94e74876-89f6-4559-9b82-3dec10a7b079> [Consulté 14-04-2014].

BAYED A. Variabilité de la croissance de *Donax trunculus* sur le littoral marocain : Dynamique des populations marines [En ligne]. 1998, 35, 11-23. Disponible sur : <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=98606239> [Consulté le 28-04-2014].

BEGUL J. Etude de la capacité antioxydant en lien avec la reproduction chez l'huître creuse *Crassostrea gigas* [En ligne]. Th. doct. : Université de Bretagne occidentale, 2012, 145p. Disponible sur : http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/83/85/03/PDF/These-2012-EDSM-Biologie_marine-BEGUEL_Jean-Philippe.pdf [Consulté 08-05-2014].

BELBACHIR C., CHAFI A., AOUNITI A., KHAMRI M. Qualité microbiologique de trois espèces de Mollusques Bivalves à intérêt commercial récoltées sur la côte méditerranéenne nord-est du Maroc [En ligne]. 2014, 5 (1), 304-309. Disponible sur : http://www.jmaterenvirosci.com/Document/vol5/vol5_N1/36-JMES-600a-2014-Chaouki.pdf [Consulté le 15-04-2014].

BONNOT F. Superoxyde réductase : Mécanisme de transfert d'électrons vers le site actif et rôle de la lysine 48 dans la catalyse [En ligne]. Th. doct. : Université Joseph Fourier-Grenoble I, 2009, 222p. Disponible sur : http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/47/04/11/PDF/these_Florence_BONNOT.pdf [Consulté 28-05-2014].

BOUHAIMI A., IDIHALLA M., LAGBOURI A., MOUKRIM A. Etude de la biologie de trois Mollusques Bivalves (*Donax trunculus*, *Mytilus galloprovincialis* ET *Perna perna*) de la baie d'Agadir [En ligne]. 1997, 3, 20-22. Disponible sur : <http://www.researemer.org/agadir/> [Consulté le 16-05-2014].

BOUREILLE E., CHAMOIN V. Introduction aux radicaux libres et espèces réactives de l'oxygène [En ligne]. 2012. Disponible sur : http://12bichat20122013.weebly.com/uploads/1/3/9/0/13905422/roneo_11.pdf [Consulté le 05-06-2014].

BOUSSOUFA D., MASMOUDI W., GHAZALIN D. Utilisation d'un Mollusque bivalve: *Donax trunculus* comme indicateur de la qualité des eaux littorales dans le golfe de Tunis [En ligne]. 2007, 38, 239. Disponible sur :- d.boussoufa@voila.fr [Consulté le : 16-05-2014].

BRIGNON J. Cadmium et ses dérivés [En ligne].10-05-2005.Disponible sur : http://www.ineris.fr/rsde/fiches/fiche_cadmium.pdf [Consulté le 03-04-2014].

BRUGNEAUX S., PIERT L., MAZATAUD V. Les agressions d'origine anthropique sur le milieu marin côtier et leurs effets sur les écosystèmes coralliens et associés de la Martinique [En ligne]. 2004. 87. Disponible sur : http://www.observatoirepesticides.fr/upload/bibliotheque/718183789136648901177254880286/1_2_Martinique_agressions_origine_anthropique_milieu_marin_ecosystemes_coralliens.pdf [Consulté le 12.04.2014].

BURNOL A., DURO L., GRIVE M. Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines [En ligne]. 2006. Disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Elements-traces-metalliques-Guide.html> [Consulté le 09-05-2014].

C

CALLIER M. Influence de la mytiliculture (*Mytilus edulis*) sur les caractéristiques physico-chimiques du sédiment et sur les communautés macrobenthiques [En ligne]. Th. doct. : Université du Québec à Rimouski. 2008, 279 p. Disponible sur : http://semaphore.uqar.ca/144/1/Myriam_Callier_fevrier2008.pdf [Consulté 11-04-2014].

CHABAUD M. Utilisation des antioxydants en hépatologie chez les carnivores domestiques [En ligne].Th. doct. : Université CLAUDE-BERNARD - LYON I (Médecine - Pharmacie), 2007,

109p.

Disponible

sur :

http://www2.vetagrosup.fr/bib/fondoc/th_sout/dl.php?file=2007lyon064.pdf[Consulté le 04-04-2014].

CHEGGOURM. Bioaccumulation de quelques éléments métalliques (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Mn, Fe,) chez un mollusque bivalves *scrobicularioplanan*, dans l'estuaire du bouregreg(Côte atlantique marocaine) [En ligne]. 1989, 13,125-133. Disponible sur : http://www.facmv.ulg.ac.be/amv/articles/1989_13.pdf. [Consulté le 15-04-2014].

CHINA B., DESCHAETZENM., DAUBE G. les mollusques bivalves ; des alimentent dangereux. Annales de Médecine Vétérinaire[En ligne]. 2003, 147, (6) ,413-422.Disponible sur : http://www.facmv.ulg.ac.be/amv/articles/2003_147_6_05.pdf. [Consulté le 14-01-2014].

COOPER S. L'importance relative de l'eau et de la nourriture comme vecteurs d'accumulation du cadmium chez le bivalve d'eau douce *Pyganodon grandis* [En ligne]. Th. doct. : Université du Québec. 2008, 245p. Disponible sur : <http://espace.inrs.ca/457/1/T000500.pdf> [Consulté le 13-04-2014].

CRISTOL J.P., MORENA M., DUPUY A.Inflammation, Stress oxydant et Risque cardiovasculaire [En ligne].2013. Disponible sur : <http://www.sfhta.eu/wp-content/uploads/2013/04/Inflammation-stress-oxydant-et-risque-cardiovasculaire-JP-Cristol-M.-Morena.pdf> [Consulté le 06-05-2014].

CRISTOL J-P. Marqueurs du Stress Oxydant syndrome métabolique[En ligne].2013. Disponible sur : <http://www.agropolis.fr/pdf/sm/Cristol.pdf>[Consulté le : 12-05-2014].

D

DOELSCH E. Elément traces métalliques [En ligne]. 2004. Disponibles sur : <http://www.mvadreunion.org/FCKeditorFiles/File/rapports/synth.%20inventaire%20ETM.pdf> [Consulté le 15-04-2014].

ELBEKKAY K., MELHAOUI M. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime [en ligne]. Tanger, MAROC. EDITION 2, 2011, 319-322p. Disponible sur : <http://www.paralia.fr> – Available [Consulté 19-03-2014].

F

FALCY M., JARGOT D., ROBERT S., SERRE P. Cuivre et ses composés [En ligne]. 2013. Disponible sur : <http://www.inrs.fr/accueil/dms/inrs/FicheToxicologique/TI-FT-294/ft294.pdf> [Consulté le 01-04-2014].

FAVIER A. Le stress oxydant intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique [En ligne]. 2003. Disponible sur : <http://www.lbmroanne.com/docs/stress%20oxydant/Favier.pdf> [Consultée le 11-04-2014].

FERNANDO M., AMANDINE P. Les amas coquilliers du site I miwaia (Canal Beagle, Argentine). Étude des coquilles *Mytilusedulis* au moyen de la FTIR-ATR [En ligne]. 2013, 117,135–160. Disponible sur : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003552113000265?via=sd> [Consulté le 14-04-2014].

FOURNIER E. Bioaccumulation du sélénium et effets biologiques induits chez le bivalve filtreur *Corbiculafluminea*. Prise en compte de l'activité ventilatoire, de la spéciation du sélénium et de la voie de contamination [en ligne]. Th. doct. : Université Bordeaux, 2005, 185 p. Disponible sur : http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Theses-soutenues/DEI/Documents/2005-these-fournier.pdf [Consulté le : 07-05-2014].

G

GARAIT B. Le stress oxydant induit par voie métabolique (régimes alimentaires) ou par voie gazeuse (hyperoxie) et effet de la GliSODin [En ligne].Th. doct. : Université JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1, 2006,214p. Disponible sur :

http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/12/08/61/PDF/these_Blandine_GARAIT.pdf

[Consulté le 05-05-2014].

GARDES M., BONNEFONT D., ABEDINZADEH Z., JORED. Espèces réactives de l'oxygène Comment l'oxygène peut-il devenir toxique ? [En ligne].2003. Disponible sur :http://www.helioxplongee.fr/cariboost_files/Radicaux_20Libres.pdf[Consulté le : 12-04-2014].

GARIN M., SIMON O. Cadmium 109 et environnement [En ligne]. 2004.

Disponible sur : http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionuclides/Documents/environnement/Cadmium_Cd109_v1.pdf [Consulté le 15-04-2014].

GARNIER R. Toxicité du plomb et de ses dérivés [En ligne]. 2005, 2,67-88.

Disponible à l'adresse :<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54417-FR.pdf>[Consulté le 04-04-2014].

GIAMBERINI L. Etude des mécanismes de transport et de détoxification des métaux lourds chez la moule d'eau douce dreissenapolyomorpha, rôle des hemocytes et des organes du système excréteur (histologie ultrastructure, microanalyse) [En ligne]. Th. doct. : Université de Metz, 1993,181p. Disponible sur :<http://www.worldcat.org/title/etude-des-mecanismes-de-transport-et-de-detoxication-des-metaux-lourds-chez-la-moule-deau-douce-dreissena-polyomorpha-role-des-hemocytes-et-des-organes-du-systeme-excreteur-histologie-ultrastructure-microanalyse/oclc/689815744>[Consulté le 23-05-2014].

GOUDABLE J., FAVIER A. Radicaux libres oxygénés et antioxydants [En ligne]. 1997, 11,115-20. Disponible sur :<http://www.journals.elsevier.com/nutrition-clinique-et-metabolisme/most-downloaded-articles/>.[Consulté le 09-05-2014].

GOUZY A., DUCOS G. La connaissance des éléments traces métalliques : Un défi pour la gestion de l'environnement [En ligne]. 2008. Disponible sur : http://www.appa.asso.fr/_docs/7/fckeditor/file/Revue/AirPur/Airpur_75_Gouzy.pdf [Consulté le 15-04-2014].

H

HABI S. Etude de la métallo-résistance et de l'Halo Tolérance des entérobactéries isolées des eaux de la région de Sétif [En ligne]. Th.doct. : Université Ferhat ABBAS, 2000, 102p. Disponible sur : http://www.univ-setif.dz/Tdoctorat/images/stories/pdf_theses/facultes/snv/THESE_HABI.pdf [Consulté le 01-04-2014].

HAMMI H. La pollution des eaux par les métaux lourds [En ligne]. 2010. Disponible sur : halim.hammi@inrst.rnrt.tn [Consulté le 03-05-2014].

HARDIVILLIER Y. Caractérisation et expression des gènes de métallothionéines chez deux modioles hydrothermales: *Bathymodiolus thermophilus* et *Bathymodiolus azoricus* [En ligne].Th. doct. : Université du Maine, 2005, 164 p. Disponible sur : <http://lbge.univ-lemans.fr/equipe/Theseyh.pdf> [Consulté le : 15-04-2014].

HATON C. Effets des rayonnements ionisants sur la structure et la fonction de la cellule épithéliale intestinale [En ligne]. Th. doct. : Université Paris VI, Pierre et Marie Curie, 2005, 147p. Disponible sur : http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Thesessoutenues/DRPH/Documents/2005-these-haton.pdf [Consulté le 04-04-2014].

HUYNH T. Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante/ ver de terre/ microflore tellurique [En ligne]. Th. doct. : Université PARIS EST, 2009, 260p. Disponible sur : http://horizon.documentation.ird.fr/exl doc/pleins_textes/divers11-03/010047897.pdf [Consulté le 05-05-2014].

JEFF. Free radicals-Définition [Enligne]. 2013. Disponible sur : http://www.helioxplongee.fr/cariboost_files/Radicaux_20Libres.pdf [Consulté le 07-05-2014].

K

KADOUCHE S. Utilisation des biomatériaux dans le traitement des eaux [en ligne]. Th. doct. : Université de Mouloud Mammeri, 2013, 150p. Disponible sur : http://www.ummo.dz/IMG/pdf/KADOUCHE_Slimane.pdf[Consulté le 11-03-2014].

KEBIECHE M. Activité biochimique des extraits flavonoïdiques de la plante *Ranunculus repens* L : effet sur le diabète expérimental et l'hépatotoxicité induite par l'Epirubicine [en ligne]. Th. doct. : Université Mentouri, 2009, 124p. Disponible sur : <http://fr.scribd.com/doc/81942238/KEB55>[Consulté le : 01-04-2014].

KHALID O., BRHIMI O. Substances bioactives élaborées par des cyanobactéries isolées de certains écosystèmes aquatiques marocaine [En ligne]. 2009. 05, 02, 260-29. Disponible sur : <http://www.afriquescience.info/docannexe.php?id=1592>[Consulté le : 04-04-2014].

L

LABAT L., LHERMITTE M. Sources, exploration et prise de l'intoxication par le plomb [Enligne]. 2007,5, 390, 45-49. Disponible sur : <http://www.emconsulte.com/article/134402/article/sources-exploration-et-prise-en-charge-de-l-intoxi>[Consulté le 06-03-2014].

LACOLLEY P. Biologie et pathologie du cœur et des vaisseaux [En ligne]. John libbey eurotexte, 2008, 312p. Disponible sur : http://www.unitheque.com/Livre/john_libbey_eurotext/Biologie_et_pathologie_du_coeur_et_des_vaisseaux-18690.html#onglet[Consulté le 22-04-2004].

LETENDRE J. Effets combinés de l'intertidalité et de la contamination chimique chez *Mytilus edulis* : Mécanismes enzymatiques antioxydants et approche proxémique [En ligne]. Université

du Havre, 2009, 319 p. Disponible sur : http://seineaval.crihan.fr/web/attached_file/componentId/kmelia53/attachmentId/21073/lang/fr/nam[Consulté 14-01-2014].

LUNA A. Les phenoloxydases chez l’huitre creuse *crassostrea gigas* :biomarqueurs potentiels de stress environnemental [En ligne]. Th. doct. : Université de la rochelle. 2010, 410p. Disponible sur : http://tel.archivesouvertes.fr/docs/00/56/72/16/PDF/LUNA_ACOSTA_Andrea_ManuscritThese_de_Doctorat.pdf [Consulté le 06-05-2014].

M

MALLET A., MAYRAND E., OUELLETTE M., MALLET V. Contamination bactérienne chez des bivalves cultivés dans le Havre de Shippagan (Shippagan, Nouveau-Brunswick) [En ligne] .2009. Disponible sur : <http://www.dfompo.gc.ca/Library/336172.pdf>[Consultée le:08-04-2014].

MARNET. Radicales libres – Définition [En ligne].2013. Disponible sur : [://sante-medecine.commentcamarche.net/faq/14139-radicaux-libres-definition](http://sante-medecine.commentcamarche.net/faq/14139-radicaux-libres-definition) [Consulté le :09-04-2014].

MARTOJA M. Mollusques [En ligne].1998.Disponible sur :<http://www.mer-littoral.org/ressources-biologie-marine.php>[Consulté le : 07-05-2014].

MEDHIOUB W. Etude des mécanismes de contamination des mollusques bivalves par des neurotoxines à action rapide (FAT) & développement de procédés de détoxification [Enligne]. Th. Doct. : Université de Tunis El-Manar & Université de Bretagne Occidentale, 2011, 211p. Disponible sur : http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/59/82/47/PDF/MS_ThA_se_MW-Finale.pdf. [Consulté13-04-2014].

MERCAN D. Le stress oxydatif [En ligne]. 2010. Disponible sur : <http://www.ar-l.ch/Docs/mercan.pdf> [Consulté le 06-05-2014].

MERZOUKI M., TALIB N., SIF J. Indice de condition et teneurs de quelques métaux (Cu, Cd, Zn et Hg) dans les organes de la moule *Mytilus galloprovincialis* de la côte d'El Jadida (Maroc) [En ligne]. 2009, 31 (1), 21-26. Disponible sur : <http://www.is.um5a.ac.ma/IMG/pdf/Merzouki-2.pdf> [Consulté le : 16-05-2014].

MINIG V. Etude du mécanisme de régulation du gène et de l'importance biologique de la superoxyde dismutase a manganèse dans la croissance tumorale mammaire [En ligne]. 2009, 404p. Disponible sur : http://docnum.univlorraine.fr/public/SCD_T_2009_0032_MINIG.pdf [Consulté le : 09-04-2014]

MYRAND B., PROULX D., TREMBLAY R. Atelier de travail « Indicateurs de stress chez les mollusques ». MAPAQ-DIT, Gaspé [En ligne]. 2007, 20.65 p. Disponible sur : http://www.sodim.org/pdf/autresespeces/710,6_Atelier_indicateurs_stress.pdf [Consulté le 16-04-2014]

N

NAKHLE KH. Le mercure, le cadmium et le plomb dans les eaux littorales libanaises : Apport et suivi au moyen de bio indicateurs quantitatifs (Eponges, Bivalves et Gasteropodes) [En ligne]. Th. doct. : Université Paris 7, 2003, 229p. Disponible sur : <http://envlit.ifremer.fr/content/download/27384/222303/version/2/file/these-naklhe.pdf> [Consulté le 01-04-2014].

NZENGUE Y. Comparaison des mécanismes de toxicité redox du cadmium, du cuivre et du zinc : place des métallothionéines et de p53 [En ligne]. Th. doct. : Université JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1, 2008, 297p. Disponible sur : http://tel.archivesouvertes.fr/docs/00/28/15/77/PDF/THESE_YVES_FINAL.pdf [Consulté le 04-04-2014].

NOUAILHAT A. Description de *Mytilusedulis*, juin 2006. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.mer-littoral.org/14/mytilus-edulis.php> [Consultée le 11-04-2014].

O

OURSEL B. Transferts et dynamique des contaminants métallique en zone côtière. Impact d'une grande agglomération méditerranéenne [En ligne]. Th. doct. : Université de Toulon, 2013, 217p. Disponible sur http://protee.univtln.fr/capte/manuscrit/Oursel_101213_Manuscrit.pdf [Consulté le 15-04-2014].

P

PASTRE J. Intérêt de la supplémentation en antioxydants dans l'alimentation des carnivores domestiques [En ligne]. Th. doct. : Université Paul-Sabatier de Toulouse, 2005, 110p. Disponible sur : http://www.revmedvet.com/2007/RMV158_180_189.pdf [Consulté le : 12-04-2014].

PICHARD A. Cuivre et ses dérivés [En ligne]. 2005. Disponible sur : <http://www.magnetosynergie.com/PagesFr/Prentez/LeCuivre/Download/LeCuivre&SesDerives.pdf> [Consulté le 03-04-2014].

PICHARD A. Plomb et ses dérivés [En ligne]. 2003. Disponible sur : <http://www.ineris.fr/substances/fr/substance/getDocument/2834> [Consulté le 03-04-2014].

PICARD R., TEMBLAY B, MYRAND B. Revue de littérature et fiches descriptives des différents indicateurs de stress et de vitalité utilisés pour caractériser les mollusques bivalves [En ligne]. 2010, 26p, 188. Disponible sur : <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs2010124> [Consulté le 06-05-2014].

PICHARD A. Zinc et ses dérivés [En ligne]. 2005. Disponible sur : http://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ineris.fr%2Fsubstances%2Ffr%2Fsubstance%2FgetDocument%2F2864&ei=UiM9U9TVJYWq4ASK0IG4Bw&usg=AFQjCNFwh_S_Bh9uU0KKPmVTrA7KvBN05g&bvm=bv.63934634,d.bGE [Consulté le 03-04-2014].

PINCEMAIL J., BONJEAN K., CAYEUX K, DEFRAIGNE J. Nutrition et stress oxydant Mécanismes physiologiques de la défense antioxydant [En ligne].2002,16, 233–239. Disponible à sur : <http://www.em-consulte.com/en/article/15029>[Consulté 05-03-2014].

POEY J., PHILIBERT C. Toxicité des métaux [En ligne]. 2000, 9, 323, 35-43. Disponiblesur:french.lef.org/protocols/health_concerns/heavy_metal_toxicity_refs.htm [Consulté le 06-03-2014].

POISSON C. Rôle du stress oxydant au niveau hépatique et rénal dans la toxicité de l'uranium après exposition chronique [En ligne].Th. doct. : Université PARIS-SUD 11, 2013, 232p. Disponible sur : http://tel.archivesouvertes.fr/docs/00/95/01/41/PDF/VA2_-_POISSON-MOREAUDELIZOREUX_CLEMENTINE_20012013.pdf [Consulté le 06-05-2014].

POISSON E. Effets de la contamination chimique : Des organismes en danger ? [En ligne]. Edition AAZ Consultants. Mars 2011,70p. Disponible sur : http://seineaval.crihan.fr/web/attached_file/componentId/kmelia106/attachmentId/24907/lang/fr/name/maquetteVF_reduite.pdf [Consulté le 06-05-2014].

POTOT S., BERTHOLON J. Paléontologie évolutive organisme : Futura- Sciences [En ligne]. 26-10-2001. Disponible sur : <http://www.ateliersante.ch/mercure-detox.htm>. [Consultée le 11-03- 2014].

R

RAHAL W. Contribution à l'étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et différents maillons de la chaîne trophique du littoral extrême Ouest Algérien [En ligne]. Th. doct. : Université de Tlemcen, 2012, 117p. Disponible sur : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/2031/1/Doctorat-RAHAL-Wacila.pdf> [Consulté le 11-03-2014].

RECKING C. Protocole conseillé pour éliminer les métaux lourds [En ligne].2005. Disponible sur :<http://www.ateliersante.ch/mercure-detox.htm>[Consultée le 09 avril 2014].

REES J., ZAL F., THOME J-P. Enfer et paradis : la toxicité de l'oxygène chez les organismes abyssaux [En ligne]. 2004, 03, 30, p.277-291.Disponible sur : <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=19118390>[Consulté le 15-04-2014].

REGIS B. Environnement : les bio-indicateurs, définition, rôles et limites [En ligne].08-2013. Disponible sur : <http://suite101.fr/article/environnement--les-bio-indicateurs-definition-rôles-et-limites-a32112> [Consulté le 13-05-2014].

ROGER P. Les propriétés environnementales des éléments traces Particularités et conséquences pour l'analyse de risques [En ligne]. 2011. Disponible sur : http://www.cneeic.org/file/publications/Les_proprietes_des_elements_traces/00_les_proprietes_environmentales_des_elements_tracesoriginal_28_1_2011_mis_en_page_21_2_2011.pdf[Consultée le 27-03-2014].

RONALD L. Implication des espèces réactives de l'oxygène dans le contrôle central de l'osmorégulation [En ligne]. Th. doct. : Université Paris VI, Pierre et Marie Curie, 2011, 117p. Disponible sur : http://tel.archivesouvertes.fr/docs/00/63/68/59/PDF/These_2011_Ronald_StLouis.pdf [Consulté le 06-05-2014].

ROUANE O. Bio surveillance de la qualité des eaux côtières du littoral occidental Algérien, par le suivi des indices biologiques, de la biodisponibilité et la bioaccumulation des métaux lourds (Zn, Cu ; Pb et Cd) chez la moule *Mytilusgalloprovincialis* et l'oursin *paracentrotuslividus*[En ligne]. Th. doct. : Université d'Oran, 2013, 249p. Disponible sur : <http://www.univ-oran.dz/theses/document/13201344t.pdf>[Consulté le 01-04-2014].

ROUSSEL A., FAVIER H. Éléments-trace essentiels en nutrition humaine:chrome, sélénium, zinc et fer [En ligne]. 2009. Disponible sur : <http://www.ysonut.fr/pdf/Ysodoc/D030102.pdf> [Consulté le 15-04-2014].

ROUSSELET E. Réponse cellulaire vis-à-vis de l'exposition au cadmium chez les animaux. [En ligne]. Th. doct. : Université JOSEPH FOURIER, 2007, 245p.
Disponible sur : http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/58/42/38/PDF/THESE-estelle_rousselet.pdf [Consulté le 05-05-2014].

S

SABOURAUD S., COPPERE B.,[et al.]. Intoxication environnementales des métaux par le plomb liée à la conservation de boissons dans un artisanat en céramique vernissée [En ligne]. 2009, 30, 1038-1043. Disponible sur: http://www.researchgate.net/profile/Sabine_Sabouraud/publication/5269825_Environmental_lead_poisoning_from_leadglazed_earthenware_used_for_storing_drinks/file/d912f502801d6366fb.pdf [Consulté le 12-04-2014].

SALVAYRE A., SALVAYRE R. Effet protecteur des acides gras contre le stress oxydatif: Implication en physiopathologie vasculaire [En ligne]. 2005, 5, 12, 433-438. Disponible sur : <http://www.jle.com/e-docs/00/04/17/F7/article.phtml> [Consulté le : 18-04-2014].

SERVAIS S. Altérations mitochondriales et stress oxydant pulmonaire en réponse à L'ozone : effets de l'âge et d'une supplémentation en Oméga-3 [En ligne]. Th. doct. : Université Claude Bernard-Lyon1, 2004, 161p. Disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/06/37/99/PDF/servais.pdf> [Consulté le : 28-05-2014].

V

VARRAULT G. Les contaminants dans les milieux récepteurs sous forte pression urbaine [En ligne]. Th. d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université PARIS-EST CRETEIL VAL DE MARNE, 2012, 89p. Disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/67/64/86/PDF/manuscrit-HDR-Varrault.pdf> [Consulté le 12-04-2014].

VELTZ-BALATRE I., BIAGIANTI-RISBOURG S., VERNEP G. *Lumbriculus variegatus* Miiller l'étude de la toxicité des métaux lourds [En ligne]. 2000, 39, 527-540.

Disponible à l'adresse : <http://portaildoc.oieau.fr/entrepotsOAI/EIA/B16832.pdf>. [Consulté le 07-03-2014].

VERONIQUE M. Etude de la réponse des métallothionéines chez les bivalves, *Corbiculafluminea*, *Dreissenapolymorpha* et *Crassostreagigas*, après exposition au cadmium et au zinc- Approches in situ et expérimentales [En ligne]. Th.doc. : Université BORDEAUX 1, 2005, 202p. Disponible sur [:http://grenet.drimm.ubordeaux1.fr/pdf/2005/MARIE_VERONIQUE_2005.pdf](http://grenet.drimm.ubordeaux1.fr/pdf/2005/MARIE_VERONIQUE_2005.pdf) [Consulté le 09-04-2014].

Viau C., Tardif R. Environnement et santé publique [En ligne]. 2003. Disponible sur [:http://www.dsest.umontreal.ca/documents/1.pdf](http://www.dsest.umontreal.ca/documents/1.pdf) [Consulté le 05-05-2014].

VIDAL M. Etude de Marqueurs biochimiques de pollution chez le mollusque bivalve d'eau douce *Corbicula Fluminea* (Muller)-purification et caractérisation des glutathion s-Transférases [En ligne]. Th. doct. : Université bordeaux I, 2001, 260p. Disponible sur [:http://grenet.drimm.u-bordeaux1.fr/pdf/2001/VIDAL_MARY-LAURE_2001.pdf](http://grenet.drimm.u-bordeaux1.fr/pdf/2001/VIDAL_MARY-LAURE_2001.pdf) [Consulté 13-04-2014].

Z

ZAZZO J-F. Quelle place dans le stress oxydatif recommandations [En ligne]. 2011. Disponible sur : http://www.srlf.org/rc/org/srlf/htm/Article/2011/20111120-234904605/src/htm_fullText/fr/20111118JFormNutritionJF_ZazzoMicronutriments.pdf [Consulté le 05-05-2014].

ZEGMOUTM., ELADDOULI J., CHAHLAOUI A, DEMNATI S., CHAFI A.

Bioaccumulation de quelques métaux lourds (Zn, Fe,Cu, Pb, Cd) chez la petite praire au niveau de l'Embouchure de la Moulouya (Maroc Nord Oriental) [en ligne]. 2011,3, 111-212. Disponible sur : www.sciencelib[Consulté le 13-12-2013]

ZORAN M., VALERIE S., GUY H. Adaptation des organismes aux conditions extrêmes des sources hydrothermales marines profondes [en ligne]. 2006, 329, 527–540.Disponible sur : <http://france.elsevier.com/direct/CRASS3/>[Consulté le 04-04-2014].

Web graphie :

[01]INERIS. Cuivre [En ligne]. Août 2013. Disponible sur : http://helpdesk-reach-clp.ineris.fr/sites/portailsnar.gesreg.fr/files/documents/newsletter/Lettre_information_helpdesk_086.pdf [Consulté le 01-04-2014].

[02]CENTRE D'INFORMATION DE CUIVRE LAITONS ET ALIAGES. Le cuivre : un élément essentiel dans notre aliment [En ligne]. 2004.Disponible sur : http://www.cuivre.org/media/pdf_2003/fichier_3.pdf [Consulté le 15-04-2014].

[03]CENTRE D'INFORMATION DE CUIVRE LAITONS ET ALIAGES. Le cuivre dans la construction santé et environnement [En ligne].Disponible sur : <http://www.magnetosynergie.com/PagesFr/Pretez/LeCuivre/Download/LivreBlancDuCuivreDansLaConstruction.pdf>[Consulté le 15-04-2014].

[04]INSTITUT NATIONAL DE SANTE PUBLIQUE DU QUEBE. Cuivre [En ligne]. Mars 2013. Disponible sur : <http://www.inspq.qc.ca/PDF/publications/198-CartableEau/Cuivre.pdf> [Consulté le 15-04-2014].

[05]IFRMER. Le plomb en milieu marin[En ligne]. 1993. Disponible sur : <http://archimer.ifremer.fr/doc/1993/rapport-1449.pdf>[Consulté le : 10-05-2014].

[06]<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/bivalve/27349> [Consulté le 01-03-2014].

[07]CAREX. Cadmium et ses composés [En ligne]. 2009. Disponible sur : <http://www.cancer-environnement.fr/LinkClick.aspx?fileticket=KgKP-3uCcMg%3D&tabid=318&mid=1724> [Consulté le 15-04-2014].

[08]http://www.plancton-du-monde.org/module-formation/diato_06.html[Consulté le 17-05-2014].

[09]JEAN M., DESLOUS P. Toxicité des éléments métalliques dissous pour les larves d'organisme marin [En ligne]. Disponible sur : <http://archimer.ifremer.fr/doc/1981/publication-1885.pdf> [consulté le 08-03-2014].

[10]<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/mollusque/70981>[Consulté le 01-03-2014].

[11]<http://www.animalbase.unigoettingen.de/zooweb/servlet/AnimalBase/home/species?id=22691>[Consulté le 5-03-2014].

[12]<http://coquifran.canalblog.com/archives/2012/10/29/25448750.html>[Consultée le 12-04-2014].

[13]<http://davidetceline.over-blog.com/article-pecheur-d-islande-48880678.html>[Consultée le 12-04-2014].

[14]<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Miesmuscheln-2.jpg>[Consultée le 12-04-2014].

[15]http://4.bp.blogspot.com/SLtb9CnA4B4/T_SM6eUWJrI/AAAAAAAAA8E/ZYqH5oiowqQ/s400/anatomie+dissection+moule+mytilus+edulis.jpg[Consultée le 09-04-2014].

[16]http://www.usherbrooke.ca/biologie/fileadmin/sites/biologie/documents/Programmes_d_etudes/Ecologie_internationale/Belanger_David_ECL_741_essai_version_finale.pdf [Consulté le 06-03-2014].

[17]http://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&doc_id=Juat1iaAAb2tDM&tbnid=B5XfveDDWxNi-M:&ved=0CAUQjRw&url=http%3A%2F%2Fwww.pratique.fr%2Fmoules-milliards-comptentrivages.html&ei=yF9IU5GYIenG0QXypoCoBg&bvm=bv.64542518,d.d2k&psig=AFQjCNH4dRfILDtFNbn8xjtYh9HrCyjaVg&ust=1397337647023997[Consulté le :12-005-2014].

[18] <http://licences.dvp6.free.fr/Files/Other/5Cour Mollusques.pdf>[Consulté le : 12-05-2014]

[19]<http://www.pratique.fr/moules-milliards-comptent-rivages.html>[Consulté le : 10-04-

2014].

[20]<http://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&docid=Juat1iaAAb2tDM&tbnid=B5XfveDDWxNiM:&ved=0CAUQjRw&url=http%3A%2F%2Fwww.pratique.fr%2Fmoulesmilliardscomptrivages.html&ei=yF9IU5GYIenG0QXypoCoBg&bvm=bv.64542518,d.d2k&psig=AFQjCNH4dRfILDtFNBn8xjtYh9HrCyjaVg&ust=1397337647023997>
[Consultée le 09-04-2014].

[21]<http://www.finemaree.com/biologie.html> [Consulté le: 04-04-2014].

[22]**Parc National de Camargue Biotope.** Etude Globale Sur La Telline DONAX TRUNCULUS (LINNE 1767). Biotope, P2A Développement ,2007.Disponible sur : http://www.parccamargue.fr/getlibrarypublicfile.php/9d0ef91c2bfce167072718755f1a86ba/parcamargue/collection_library_fr/201100131/0001/Etude_telline_globale.pdf [Consulté le 15-03-2014].

[23]<http://www.fao.org/docrep/009/y5720f/y5720f06.htm>[Consulté le 19-03-2014].

[24]Ecotoxicologie des métaux. 2013. Disponible sur : <http://www.ulb.ac.be/facs/sciences/biol/biol/2012-2013/Metaux.pdf>[Consulté le 19-03-2014]

Résumé:

Dans le cadre d'évaluation de l'impact de la toxicité des métaux lourds sur le système de défense enzymatique chez les Mollusques bivalves, nous avons mené une étude théorique sur le comportement des bivalves mollusques vis-à-vis d'un xénobiotique, et plus particulièrement des métaux lourds : le zinc, le cuivre, le plomb et le Cadmium.

La pollution des milieux aquatiques due par les produits industriels de synthèse, les rejets des déchets et des substances chimiques diverses est considérée comme un problème sérieux compte tenu de leur toxicité et de leur pouvoir cumulatif dans la chaîne trophique peut avoir des conséquences graves sur l'équilibre dans les organismes marins et l'équilibre écologique.

L'excès des métaux lourds provoque le stress oxydatif chez les Mollusques bivalves (*Mytilus edulis* et *Donax trunculus*) filtreurs sont souvent utilisés comme espèces sentinelles de la contamination par les métaux lourds donc ce sont des bons indicateurs et accumulateur de la pollution.

Mots clés :

Bivalve, Toxicité, Métaux, Stress.

Abstract:

Aquatic pollution generated by different factories and human activities leading to the disposals of domestic waters and chemical substance, is considered as a serious problem for our environment.

A bibliographical study concerning the impact of heavy metals toxicity (e.g., zinc, copper, lead and cadmium) on the bivalve Mollusk, particularly the behaviors and the enzymatic defense system has been investigated.

Heavy metals are able to accumulate within the trophic chain, which is being used by human. Such accumulation could have grave consequences on the health of biota and water bodies.

Metal accumulation could provoke the oxidative stress to the bivalves as *Mytilus* and *Donax* living in pollution sites. These bivalves are being used as sentinels for metal monitoring, because they are good indicators to know the distribution of metals in the aquatic environment.

Mots clés :

Bivalve, Toxicité, Métaux, Stress.

الملخص

في إطار تقييم التأثير السمي للمعادن الثقيلة على نظام الدفاع الإنزيمي عند الرخويات ثنائية الصدفة قمنا بإجراء دراسة نظرية حول تأثير المواد السامة وخاصة المعادن الثقيلة الزنك النحاس الرصاص الكاديوم. يعتبر تلوث الأوساط المائية بسبب المنتجات الصناعية رمي النفايات و المواد الكيميائية المختلفة يعتبر مشكلة خطيرة نظرا لسمية المعادن الثقيلة ينتج عنها عواقب خطيرة نظرا على مستوى الكائنات البحرية وكذلك على التوازن البيئي زيادة تركيز المعادن الثقيلة في الوسط المائي بسبب الأكسدة للرخويات ثنائية الصدفة

Donax trunculus et Mytilus edulis

و غالبا ما تستعمل هذه الأنواع مؤشر جيد للتحقق من تلوث الأوساط المائية.

الكلمات المفتاحية :

ثنائية الصدفة التسمم المعادن الأكسدة