



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued
Faculté des sciences naturelles et de la vie

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER PROFESSIONAL

Spécialité: Toxicologie

Intitulé:

**Un système biophysique d'activation de l'eau
par magnétisation et plasma froid pour
améliorer la réponse métabolique et réduire la
biotoxicité**

Présenté par:

❖ Dahmane chaima

❖ Rezazga wissam

Soutenue le:

Devant le jury composé de:

Dr: Tlili Mohammed el-Eid

Président

Dr: Ghania Ahmed

Examineur

Dr: Ghemmam Amara Djilani

Encadreur

Dr: Miloudi Abd el-monim

Co-encadreur

Année universitaire : 2025/2026

شكر وتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تُدرك الغايات، نحمده سبحانه حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه، أن يسرّ لنا طريق العلم، وألهمنا الصبر والثبات حتى أتممنا هذا العمل، بعد رحلةٍ لم تخلُ من التحديات، لكنها كانت مليئةً بالأمل والإصرار.

بقلوبٍ يملؤها الامتنان، نتقدّم بأسمى عبارات الشكر والتقدير إلى أستاذنا المشرف، الذي لم يكن مجرد مؤطر أكاديمي، بل كان سنداً علمياً وإنسانياً، أثار لنا الطريق بعلمه، ووجهنا بحكمته، ورافقنا بصبره وتفانيه. فله منا خالص الامتنان وعظيم التقدير على ما بذله من جهدٍ ووقت، وما قدّمه من توجيهاتٍ ثمينة كان لها بالغ الأثر في إخراج هذا العمل إلى حيّز الوجود.

كما نتوجّه بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الكرام، الذين تفضّلوا بقبول قراءة هذا العمل وتقييمه، ونشمن عالياً ما سيقدمونه من ملاحظات قيّمة، نعتبرها خطوةً أخرى نحو التعلّم والتطوّر.

ولا يسعنا في هذا المقام إلا أن نستحضر بكل وفاء أساتذتنا الأفاضل، الذين كانوا مشاعل نورٍ في دربنا الدراسي، فغرسوا فينا حبّ العلم، وأيقظوا فينا روح الطموح، وكانوا السبب بعد الله في ما وصلنا إليه اليوم. كما نعبر عن شكرنا العميق لكل من مدّ لنا يد العون، أو قدّم لنا كلمة دعم، أو كان حضوره سنداً في لحظات التعب، فكانت تلك التفاصيل الصغيرة سبباً في الاستمرار وعدم الاستسلام.

وفي الختام، نسأل الله العليّ القدير أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن يبارك فيه وينفع به، وأن يجعله بداية طريق مليءٍ بالنجاحات والعطاء.

والحمد لله الذي هدانا لهذا، وما كنّا لنهتدي لولا أن هدانا الله.

إهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ،

﴿يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾

صدق الله العظيم، والصلاة والسلام على نبيه محمد □، رحمةً ونوراً للعالمين. أما بعد:

الحمد لله شكراً، الحمد لله حباً، الحمد لله امتناناً، الحمد لله ملء الأرض والسموات، الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات،

والحمد لله الذي بفضلله أدركتُ أسمى الغايات. من قال: أنا لها نالها، وأنا لها، وإن أبتُ رغماً عنها أتيتُ بها، وبفضل الله نلتُها.

في رحلةٍ لم تكن باليسيرة، إلى تلك الروح التي تعثرت ثم نهضت، وحملت في قلبها يقيناً بنصر الله، استطعتُ أن أصنع من الحلم واقعاً، ومن التعب نجاحاً، وأن أزيّن اسمي بأثمن الإنجازات. أهدي لنفسي ثمرة بداية الانتصارات. إلى من زيّن اسمي بأجمل الألقاب،

إلى من زرع الطموح بالأمس وحصد الفخر اليوم، إلى من كان سنداً وعوناً في كل خطوة، لك مني كل التقدير والوقار... أبي الغالي. ولك يا من أوصى بك الرسول □ فقال: «أملك، ثم أملك، ثم أملك»، أهديك ثمرة صبرك ودعائك، وبفضل الله ما وصلتُ إلى هذا النجاح إلا بفضلك بعد الله، حفظك الله بعينه التي لا تنام. إلى من علّموني أن الدنيا كفاح، وأن سلاحها العلم والشهادة، إلى الذين لم ييخلوا عليّ يوماً بشيء، إلى من سعوا وناضلوا من أجل راحتي ونجاحي، إلى من كان دعائهم سرّ قوتي وثباتي: إخوتي بدر الدين، عماد الدين، وسند.

إلى بلسم الروح ورفيقات الدرب؛ لا أملك كلمات توفيكُن حقكُن، فأنتن السند في كل ضيق، والبهجة في كل فرح.

شكراً لوجودكن الذي يملأ حياتي دفئاً ونوراً: زهرة، لمياء، خولة، نهاد، ميادة. إلى العسل الصافي والجوهر اللامع، إلى نور حياتي: ماهر، سوسن، ريتال، تميم، جود. إلى التي كانت أختاً قبل أن تكون صديقة، لا تُعوّض، والتي أثبتت لي أن الوفاء يُعاش ولا يُقال؛ إلى من كانت دائماً الحضور الجميل في غيابي والدعم الحقيقي في ضعفي، أهدي هذا الجهد المتواضع تقديراً لمكانتها في قلبي. إلى صديقات عمري اللواتي زُيّنت الطرق بوجودهن: أساور، أسماء، نسرين.

إلى كل من وضع بصمة خالدة في هذا الإنجاز، إلى من ساندوني خلف الشاشات، إلى كل من نساهم قلبي ولم ينساهم قلبي

إهداء

﴿رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ﴾

﴿وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا﴾

العِلْمُ يرفعُ بيتًا لا عمادَ لَهُ والجهلُ يهدمُ بيتَ العزِّ والشرفِ إذا غامرتَ في شرفٍ مرومٍ فلا تقنعُ بما دونَ النجومِ

الحمد لله الذي أثار بالعلمِ دروبَ الساعين، ورفع به أقوامًا وجعلهم للخير مفاتيح، أحمده حمدًا يليق بجلاله أن بلغني هذا المقام، بعد رحلةٍ امتزج فيها التعبُ بالأمل، والسعيُّ بالدعاء. إلى من كان غيابه حضورًا لا يغيب، وذكره دعاءً لا ينقطع...

إلى أبي الغالي رحمه الله، يا من زرعتَ في قلبي حبَّ العلم، وغرستَ في روحي معنى الكفاح، كنتَ الحلم الذي أسير نحوه، والظل الذي ألوذُ به، والنور الذي اهتدي به... ها أنا اليوم أقطف ثمرَةً كنتَ أول من سقاها، فأهديك هذا العمل، عسى أن يكون نورًا يتسرّب إلى قبرك، ورحمةً تنزل عليك، ورفعَةً في عليين بإذن الله. إلى القلب الذي اختصر العالم حبًا... إلى أُمي الحبيبة، يا سرّ قوتي، وملجئي بعد الله، يا من جعلتَ من دعائك جناحين أحلقُ بهما نحو النجاح، لكِ وحدكِ تنحني كلماتي امتنانًا، وهذا الإنجاز ما هو إلا جزءٌ يسير من جميلك الذي لا يُحصى. إلى إخوتي: سيف الدين، محمد الحافظ، علي أنتم السند الذي لا يميل، والقوة التي أستند إليها في كل عثرة، بكم تشتدّ عزيمتي، وبقرّبكم يهون الطريق.

إلى أخواتي الغاليات: عائشة، تسنيم، وردة، سيرين، يا رفيقات الروح، وبهجة الأيام، كنتنّ دائماً النور الذي يخفف عني ثقل الطريق، والدفء الذي يحيط بي في كل حين. إلى أصغر أفراد العائلة: عمر، أشرف، يعقوب، سوار، أنتم الحلم الذي يكبر، والابتسامة التي لا تغيب، ومستقبلٌ أراه مشرقًا بكم. إلى غزة... لا كمدينة تُذكر، بل كقضية تُحيا في الضمائر، إلى الأرض التي تكتبُ التاريخ بدمها، وتصوغُ الكرامة من بين الركام، إلى الجراح التي لم تُطفئ نور الإيمان، وإلى الصبر الذي فاق حدود الوصف، إلى الأرواح الطاهرة التي ارتقت لتُعلم العالم أن للحرية ثمنًا، وأن للحق صوتًا لا يُخمد، نهدي هذا العمل المتواضع، لا وفاءً يُكافئ صمودكم، بل اعترافًا بعجز الكلمات أمام عظمتكم، ونسأل الله أن يجعل من ألكم فجرًا، ومن صبركم نصرًا، ومن دموعكم نورًا يبدّد ظلام الظلم، وأن تبقى غزة—رغم كل شيء—رايةً مرفوعة للعزة، وشاهدًا خالدًا على أن الحق لا يموت.

إلى أساتذتي الكرام، من علّموني أن العلم رسالة، وأن النجاح لا يُهدى بل يُنتزع بالصبر والاجتهاد.

إلى أصدقائي... كنتم السند حين مالت الخطى، والنور حين اشتدّ العتم، بكم هان الطريق، ومعكم صار النجاح أجمل، فلكم في القلب امتنانٌ لا تفنيه الكلمات.

وأخيرًا... إلى كل من مرّ في حياتي وترك أثرًا طيبًا، أهديكم هذا العمل المتواضع، راجيةً من الله أن يكون بداية دربٍ مليءٍ بالنجاح، ونورًا يُهتدى به في قادم الأيام.

Résumé

Résumé :

Cette étude visait à évaluer l'effet d'un système physico-chimique double, combinant traitement par plasma froid et champ magnétique, sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et ses implications biologiques, à l'aide d'un modèle expérimental de rats Wistar. L'objectif principal était de tester la capacité de ces traitements à améliorer les propriétés fonctionnelles de l'eau, en particulier des eaux souterraines chaudes de l'aquifère d'Albien, et d'évaluer leur innocuité biochimique et histologique. Les animaux ont été répartis en six groupes expérimentaux soumis à différents protocoles de traitement pendant 21 jours : traitement par magnétisation seule, traitement par plasma froid seul, traitement combinant les deux selon deux séquences différentes (magnétisation suivie de plasma, et plasma suivi de magnétisation), et un groupe exposé localement par pulvérisation. Les analyses physico-chimiques ont montré que le traitement par plasma froid induisait des modifications significatives des propriétés de l'eau, notamment une diminution du pH ($\leq 3,3$), une augmentation de la conductivité électrique et une augmentation de la concentration d'espèces azotées réactives telles que les nitrates et les nitrites. Ces modifications indiquent une activation chimique manifeste de l'eau, la transformant d'un milieu relativement stable – comme les eaux souterraines albanaises – en un milieu plus dynamique et fonctionnellement réactif. Sur le plan biologique, les résultats ont montré que les traitements individuels (magnétisation ou plasma froid) n'induisaient pas de modifications histologiques ou métaboliques significatives par rapport au groupe témoin, ce qui témoigne d'une bonne biocompatibilité. En revanche, le traitement combiné a démontré un effet synergique non linéaire, particulièrement lorsque le plasma était appliqué avant la magnétisation. Cet effet était associé à une élévation des marqueurs de stress oxydatif et de réponse inflammatoire, notamment une augmentation des enzymes hépatiques (ASAT et ALAT), de l'urée, de la créatinine, des marqueurs lipidiques (cholestérol total, triglycérides, LDL) et de la protéine C-réactive (CRP), ainsi qu'à une hyperglycémie. Une hépatite légère à modérée a également été observée, accompagnée d'un léger œdème cérébral dans ce groupe, tandis que les tissus rénaux, cardiaques et cutanés sont restés structurellement intacts. Par ailleurs, les améliorations significatives des propriétés physico-chimiques de l'eau, notamment l'augmentation de l'activité et de la réactivité chimiques, soulignent le potentiel considérable de ces technologies pour améliorer les propriétés fonctionnelles des eaux souterraines albanaises. De plus, l'absence de lésions tissulaires graves ou généralisées dans la plupart des conditions expérimentales indique que ces traitements, lorsqu'ils sont correctement contrôlés, n'entraînent pas d'effets indésirables importants sur l'organisme. En conclusion, cette étude démontre que le système dual possède un potentiel considérable pour améliorer les propriétés de l'eau et accroître son efficacité. Cependant, la séquence d'application et les paramètres de traitement sont des facteurs cruciaux pour déterminer les effets biologiques. Par conséquent, un contrôle rigoureux des conditions de traitement est essentiel pour trouver un équilibre entre l'amélioration de la qualité de l'eau et la garantie de la biosécurité, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'application de ces technologies dans les domaines biologique et agricole.

Mots-clés :

Plasma froid, eau magnétisée, propriétés fonctionnelles de l'eau, double traitement.

Abstract:

This study aimed to evaluate the effect of a dual physicochemical system combining cold plasma treatment and a magnetic field on the physicochemical properties of water and its biological implications, using an experimental model of Wistar rats. The main objective was to test the ability of these treatments to improve the functional properties of water, particularly hot groundwater from the Albien aquifer, and to assess their biochemical and histological safety. The animals were divided into six experimental groups that underwent different treatment regimens for 21 days, including: treatment with magnetization alone, cold plasma alone, a combination of both in two different sequences (magnetization followed by plasma, and plasma followed by magnetization), and a local spray exposure group. Physicochemical analyses showed that cold plasma treatment produced significant changes in water properties, including a decrease in pH (≤ 3.3), an increase in electrical conductivity, and an increase in the concentration of reactive nitrogen species such as nitrates and nitrites. These changes indicate a clear chemical activation of the water, transforming it from a relatively stable medium—as in Albanian groundwater—into a more dynamic and functionally reactive one. Biologically, the results showed that single treatments (magnetization or cold plasma) did not induce significant histological or metabolic changes compared to the control group, indicating good biocompatibility. In contrast, the combined treatment demonstrated a nonlinear synergistic effect, particularly when plasma was applied prior to magnetization. This was associated with elevated markers of oxidative stress and inflammatory response, including increased liver enzymes (AST and ALT), urea, creatinine, lipid markers (total cholesterol, triglycerides, LDL), and C-reactive protein (CRP), as well as elevated blood glucose. Mild to moderate hepatitis was also observed, along with mild cerebral edema in this group, while kidney, heart, and skin tissues remained structurally intact. On the other hand, the significant improvements in the physical and chemical properties of the water, particularly the increased chemical activity and reactivity, underscore the considerable potential of these technologies in enhancing the functional properties of Albanian groundwater. Furthermore, the absence of severe or widespread tissue damage under most experimental conditions indicates that these treatments, when properly controlled, do not lead to serious adverse effects on the organism. In conclusion, this study demonstrates that the dual system possesses considerable potential to improve water properties and increase its efficiency. However, the application sequence and treatment parameters are crucial factors in determining biological effects. Therefore, carefully controlling the treatment conditions is essential to achieve a balance between improving water quality and ensuring biosafety, thus opening up promising avenues for the application of these technologies in biological and agricultural fields.

Keywords:

Cold plasma, magnetized water, functional properties of water, double treatment.

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير نظام فيزيائي-حيوي مزدوج يجمع بين المعالجة بالبلازما الباردة والمجال المغناطيسي على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه، وانعكاساتها البيولوجية باستخدام نموذج تجريبي من فئران Wistar. تمحور الهدف الرئيسي حول اختبار مدى قدرة هذه المعالجات على تحسين الخصائص الوظيفية للمياه، خاصة المياه الجوفية الساخنة من طبقة الألبان (Albien)، وتقييم مدى سلامتها على المستويين البيوكيميائي والنسجي. تم تقسيم الحيوانات إلى ست مجموعات تجريبية خضعت لأنماط مختلفة من المعالجة لمدة ٢١ يوماً، شملت: المعالجة بالمغطة فقط، بالبلازما الباردة فقط، التوليف بينهما بترتيبين مختلفين (المغطة تليها البلازما، والبلازما تليها المغطة)، بالإضافة إلى مجموعة تعرض موضعي بالرش. أظهرت التحاليل الفيزيائية والكيميائية أن المعالجة بالبلازما الباردة أحدثت تغيرات ملحوظة في خصائص المياه، تمثلت في انخفاض درجة الحموضة (≥ 3.3)، وارتفاع التوصيلية الكهربائية، وزيادة تركيز الأنواع النيتروجينية التفاعلية مثل النترات والنترت. وتشير هذه التغيرات إلى حدوث تنشيط كيميائي واضح للمياه، مما يؤدي إلى تحويلها من وسط مستقر نسبياً — كما هو الحال في المياه الجوفية الألبانية — إلى وسط أكثر ديناميكية وتفاعلية من الناحية الوظيفية من الناحية البيولوجية، أظهرت النتائج أن المعالجات الأحادية (بالمغطة أو بالبلازما الباردة) لم تحدث تغيرات نسيجية أو استقلابية ملحوظة مقارنة بالمجموعة الشاهدة، مما يدل على مستوى جيد من التوافق الحيوي. في المقابل، أظهرت المعالجة المزدوجة تأثيراً تآزرياً غير خطي، خاصة عند تطبيق البلازما قبل المغطة، حيث ارتبط ذلك بارتفاع مؤشرات الإجهاد التأكسدي والاستجابة الالتهابية، بما في ذلك زيادة إنزيمات الكبد (AST) و (ALT)، واليوريا، والكرياتينين، ومؤشرات الدهون (الكوليسترول الكلي، الدهون الثلاثية، LDL)، والبروتين المتفاعل C (CRP)، إضافة إلى ارتفاع سكر الدم. كما تم تسجيل التهاب كبدي خفيف إلى متوسط، مع ظهور وذمة دماغية خفيفة في هذه المجموعة، في حين ظلت أنسجة الكلى والقلب والجلد محافظة على بنيتها. ومن جهة أخرى، فإن التحسينات الملحوظة في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه، خاصة زيادة نشاطها الكيميائي وقدرتها التفاعلية، تؤكد الإمكانات الكبيرة لهذه التقنيات في تحسين الخصائص الوظيفية للمياه الجوفية الألبانية. كما أن غياب أضرار نسيجية حادة أو واسعة النطاق في معظم الظروف التجريبية يشير إلى أن هذه المعالجات، عند التحكم في شروطها، لا تؤدي إلى تأثيرات سلبية خطيرة على الكائن الحي. ختاماً، تُظهر هذه الدراسة أن النظام المزدوج يمتلك قدرة معتبرة على تحسين خصائص المياه وزيادة فعاليتها، غير أن ترتيب التطبيق ومعاملات المعالجة يمثلان

عوامل حاسمة في تحديد التأثيرات البيولوجية. وعليه، فإن ضبط شروط المعالجة يُعد ضرورياً لتحقيق التوازن بين تحسين جودة المياه وضمان السلامة الحيوية، مما يفتح آفاقاً واعدة لتطبيق هذه التقنيات في المجالات البيولوجية والزراعية.

الكلمات المفتاحية :

البلازما الباردة، الماء الممغنط، الخصائص الوظيفية للماء، المعالجة المزدوجة.

شكر وتقدير	I
إهداء	II
Résumé	IV
Lise des abréviations	XXIV
Introduction	1
Générale	1
Partie théorique	
Chapitre 01: Généralité sur l'eau	
1.Définition et historique de l'eau:	4
2.Propriétés physicochimiques de l'eau:	4
2.1. Propriétés physiques de l'eau :	4
2.1.1. masse volumique:	4
2.1.2. Point d'ébullition:	5
2.1.3.viscosité:	5
2.1.4. Les enthalpies ou Chaleur latente:	6
2.1.5.Capacité thermique:	6
2.1.6.conductivité électrique de l'eau:	6
2.2. Propriétés chimiques de l'eau:	6
2.2.1.La dissolution des ions:	7
2.2.2.L'oxydoéduction:	7
2.2.3. pH:	8
2.3. Propriétés biologiques de l'eau:	8
2.3.1.La vie dans l'eau:	8
3.Cycle hydrologique de l'eau:	9
3.1.Évaporation:	9
3.2.Condensation:	9
3.3.Précipitations :	9
3.4.Infiltration :	10
3.5.Ruissellement :	10
4.L'importance de l'eau:	10
5. Composition de l'eau	12
5.1.Les sels minéraux:	12
5.2. Gaz dissous:	13
5.3.Matières organiques et micro-organisme:	13

Chapitre 02 : Concepts généraux concernant l'eau magnétisée

1. Notions de magnétisme:	15
2. Champs magnétiques:	16
3. Types des champs magnétiques:	17
4. Principes physiques des champs magnétiques	18
4.1. Principe de Curie	19
4.2. Règles de symétrie	19
5. La technologie de magnétisation de l'eau:	20
5.1. Définition:	20
5.2. Les principes de la technologie de magnetization:	20
5.3. Deux types d'hydro-magnétiseurs:	21
5.3.1. Technologie Japonaise ‘Delta-Water’	21
5.3.2. Technologie Allemande anneau MERUS	21
6. L'eau magnétisée:	22
6.1. Définition de l'eau magnétisée:	22
6.2. Les propriétés de l'eau magnétisée:	23
6.2.1. Les propriétés physiques	23
6.2.2. Les propriétés chimiques	24
6.3. Comment les champs magnétiques modifient les propriétés de l'eau?	24
6.4. Les effets de l'eau magnétisée:	24
6.4.1. Les effets sur l'organisme humain:	24
6.4.2. Les effets sur les plantes	25
6.4.3. Action sur les animaux:	26

Chapitre 03 : Plasma et plasma froid

1. Historique du Plasma	28
2. Généralités sur les plasmas	28
2.1. Définition	28
2.2. Formes de plasma:	29
2.2.1 Plasmas naturels	29
2.2.2. Les plasmas artificiels	30
2.3. Les différents types des plasmas	30
2.3.1. Les plasmas chauds	30
2.3.2. Les plasmas froids	30
3. Obtention du plasma	30

3.1. Augmentation de la température	30
3.2. Décharge électrique	31
4.Applications du plasma	32
5. Les paramètres physiques des plasmas	33
5.1. Densité du plasma	33
5.2. La temperature	33
5.3. La pression	34
5.3.1.Plasma à basse pression :	34
5.3.2. Plasma à pression atmosphérique :	35
5.3.3. Plasma à haute pression :	35
5.4. Degré d'ionisation	35
5.5. Libre parcours moyen	35
5.6. Le potentiel flottant	36
5.7. Longueur de Debye	36
5.8. Fréquence plasma	36
5.9. Le paramètre de couplage électrostatique	36
6. L'eau traitée au plasma froid:	37
6.1. Définition:	37
6.2. Propriétés physico-chimiques de l'eau activée par plasma	37
6.2.1. Propriétés physiques	37
6.2.2. propriétés chimiques	38
6.2.2.1. Espèces réactives de l'oxygène (ROS)	38
6.2.2.2. Espèces réactives de l'azote (ERN)	39
7. Techniques de génération d'eau activées par plasma utilisant un plasma à pression atmosphérique:	40
7.1. Jet de plasma	40
7.2. Décharge à barrière diélectrique	41
7.3. Décharge couronne	42
8. Avantages et applications d'EAP	42
8.1. Décontamination par plasma froid	42
8.2. Applications antifongiques et antivirales	43
8.3. Améliorer la sécurité alimentaire	43
8.4. Favoriser la croissance des plantes	44
9. Interaction entre la magnétisation et le plasma froid	44

1. Généralité sur le métabolisme:	47
1.1. Définition du métabolisme:	47
1.2.Types du métabolisme:	47
1.2.1. L'anabolisme:	47
1.2.2. Le catabolisme:	48
1.3.Les voies métaboliques principale:	49
1.3.1. Métabolisme du glucose (La glycolyse):	49
1.3.2. Voie des pentoses phosphates:	49
1.3.3. Cycle de Krebs:	50
1.3.4. Chaîne respiratoire:	50
1.3.5. Synthèse des protéine:	51
1.4. Régulation métabolique:	51
1.4.1. Régulation enzymatique:	51
1.4.2. Régulation allostérique:	52
1.4.3. Régulation hormonal:	52
1.4.4. Régulation de l'expression génique:	53
2.Concepts de biotoxicité:	53
2.1.Définition du biotoxicité:	53
2.2.Type de biotoxicité:	53
2.2.1. Selon l'origine:	54
2.2.1.1.Les toxines naturelles:	54
2.2.1.2. Les toxines synthétiques:	54
2.2.2.selon l'organe cible:	54
2.2.3.selon le mécanisme d'action:	55
2.2.4. selon la durée d'exposition:	55
2.2.5. selon la nature de l'effet biologique:	56
2.2.6. selon la voie d'exposition:	56
2.3. Mécanismes d'action toxique:	56
2.3.1. Mécanismes d'action moléculaire des toxines	56
2.3.2. Mécanismes d'action cellulaire des toxines	57
2.3.3. Mécanismes d'action tissulaire des toxines	57
3. Interaction entre métabolisme et biotoxicité:	57
3.1.Métabolisme des xénobiotiques:	57
3.2. Bioactivation et augmentation de la toxicité:	57

3.3. Détoxification:	58
3.4. Production de métabolites réactifs:	58
Partie experimental	
Chapitre 01 : Méthodes et materiel	
1.Zone d'étude:	61
1.1.Définition de la zone de Oued Righ:	61
1.2.Caractéristiques et qualité de l'eau dans la région:	61
2.Matériels:	62
2.1 Dispositif de magnétisation:	62
2.2. Animaux et conception expérimentale:	62
2.4. Plan expérimental:	62
2.5.Procédure expérimentale:	66
3.Méthodes:	67
3.1.Les analyses d'eau:	67
3.1.1.Détection des polluants :	67
3.1.2.Dosage du calcium Ca²⁺ :	67
3.1.3.Dosage du TH :	68
3.1.4.Dosage des chlorures Cl⁻ :	68
3.1.5.Dosage du TAC :	68
3.1.6.Dosage des nitrates :	68
3.1.7.Estimation des résidus secs :	69
3.2. Sacrifice des animaux et prélèvement des organes (foie, cœur, reins, cerveau et peau):	69
3.3.Prélèvement sanguin:	69
3.4.Analyses de sang:	69
3.5.Étude histologique :	69
3.5.1.Fixation :	70
3.5.2.Déshydratation et inclusion :	70
3.5.3.L'inclusion:	70
3.5.4.Microtomie (coupe histologique) :	71
3.5.5.Colorations :	72
3.5.6.Observation et lecture microscopique :	73
3.6.Estimation des éléments minéraux:	74
4.Résultats:	74

4.1. Evolution pondérale:	74
4.2. Résultats de l'analyse de l'eau:	75
4.2.1. Analyses physiques:	75
4.2.1.1. pH:	75
4.2.1.2. conductivité:	76
4.2.1.3. Turbidité:	76
4.2.2. Analyses chimiques:	76
4.2.2.1. le calcium (Ca^{2+}):	76
4.2.2.2. la dureté totale (TH):	77
4.2.2.3. les chlorures (Cl^-):	77
4.2.2.4. l'alcalinité (TAC):	77
4.2.2.5. les carbonates et bicarbonates:	78
4.2.2.6. les composés azotés:	78
4.2.2.6.1. Les nitrates (NO_3^-):	78
4.2.2.6.2. Les nitrites (NO_2^-):	79
4.2.2.6.3. L'ammonium (NH_4^+):	79
4.2.2.7. Les phosphates (PO_4^{3-}):	80
4.2.2.8. Restes secs:	80
4.3. Résultats des analyses de sang:	82
4.3.1. Dosage de HB:	82
4.3.2. Dosage du GB:	84
4.3.3. Dosage du plaquette:	86
4.3.4. Dosage du créat:	87
4.3.5. Dosage de l'urée:	88
4.3.6. Dosage de TGO (AST):	89
4.3.7. Dosage de TGP (ALT):	91
4.3.8. Dosage de Cholestérol:	92
4.3.9. Dosage de Tri-Glycérides:	94
4.3.10. Dosage de LDL:	96
4.3.11. Dosage de HDL:	98
4.3.12. Dosage du CRP:	100
4.3.13. Dosage du Glycémie:	102
4.3. Résultats d'étude histologique:	104

4.3.1. Le foie:	104
4.3.2. Les reins:	106
4.3.3. Le cœur:	108
4.3.4. Le cerveau:	110
4.3.5. Le peau:	112
4.4. Les résultats d'estimation des éléments minéraux:	114
4.4.1. Estimation du magnésium (Mg):	114
4.4.2. Estimation du fer (Fe):	116
4.4.3. Estimation du calcium (Ca):	118
Conclusion générale	120
Références	123

Figure01: cycle de l'eau.^(Anonyme01) **10**

Figure02: Exemples de plans d'antisymétrie **19**

Figure 03: Magnétiseur Delta-Water (ANONYME 2). **21**

Figure 04: Anneau magnétiseur MERUS (ANONYME 8). **22**

Figure 05: La structure de l'eau dynamisée en micromolécules(55) **22**

Figure 06: Schéma du champ magnétique et de la direction de l'écoulement de l'eau au cours du traitement(4) **23**

Figure 07: Cristaux de Masaru Emoto (un Médecin chercheur Japonais)(1) **23**

Figure 08: Effet de la consommation de l'eau vitalisée sur le sang(1) **25**

Figure09: Le tube de Crookes en 1869⁽³¹⁾ **28**

Figure10: Les constitutions d'un plasma⁽³¹⁾ **29**

Figure11:Foudres Aurores Polaires Anatomie d'une comète **29**

Figure12:Macro fin du stylo laser Principe de fonctionnement Lampe à plasma Néon en de plasma d'un Tokamak verre **30**

Figure13:Échelle de température pour les quatre matières. ⁽³¹⁾ **31**

Figure14: Décharge Electrique **31**

Figure15: Distribution des températures électronique T_e , ionique T_i et du gaz T_n en fonction de la pression. ⁽³⁸⁾ **34**

Figure16: Illustration du mécanisme d'activation de surface par plasma froid : (A) les espèces réactives issues du plasma interagissent avec la surface, éliminent les contaminants et introduisent des groupes oxygénés ; (B) schéma du dispositif expérimental de génération du plasma dirigé vers le substrat ; (C) comparaison du système en mode OFF/ON montrant la formation du plasma et son effet sur la surface **40**

Figure17: La figure 17(a) illustre une décharge à barrière diélectrique (DBD) typique utilisée pour générer des ondes de photoplasma (PAW), constituée de deux électrodes séparées par un matériau diélectrique. Lorsqu'une haute tension est appliquée, des charges s'accumulent à la surface du matériau diélectrique, créant un champ électrique opposé qui limite le courant et empêche la formation d'étincelles. Ce champ électrique intense provoque l'effondrement du gaz et la formation d'un plasma. Les figures 15(b) et 15(c) montrent une DBD typique utilisant un substrat de verre comme barrière diélectrique. ⁽²⁰⁾ **41**

Figure18: Représentation schématique d'une décharge couronne en configuration pointe plaque : (a) tension positive et (b) tension négative. ⁽²⁰⁾ **42**

Figure19: Représentation schématique du processus d'anabolisme, où l'énergie est utilisée pour lier des molécules simples et former des composés plus complexes, reflétant le rôle essentiel de ce processus dans la croissance et le renouvellement cellulaires.⁽⁷⁾ **48**

Figure 20: Un schéma intégré des voies cataboliques (Catabolisme) illustre comment les protéines, les sucres et les graisses sont décomposés en molécules plus simples qui entrent dans des voies centrales telles que la glycolyse, le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative, conduisant à la production d'énergie sous forme d'ATP.⁽⁵⁵⁾ **48**

Figure21: Représentation schématique de la chaîne respiratoire mitochondriale, où les électrons sont transférés des cofacteurs réducteurs (NADH, FADH₂) à travers de multiples complexes enzymatiques dans la membrane mitochondriale interne, ce qui entraîne un pompage de protons et la formation d'une force motrice de protons utilisée dans la phosphorylation oxydative pour produire de l'ATP, l'oxygène étant l'accepteur final d'électrons et de l'eau étant formée. ⁽²⁸⁾ **50**

Figure22: La figure illustre une voie de contrôle de la qualité de la synthèse protéique au sein de la cellule. Les protéines incomplètes ou défectueuses sont détectées lors de la traduction et dirigées vers la dégradation ou leur traitement plutôt que leur accumulation. Le texte met l'accent sur le rôle des cofacteurs (tels que SmpB) dans un mécanisme de réparation/correction qui contribue à garantir l'intégrité des protéines, faisant de ce système une cible potentielle pour le développement de nouvelles thérapies. ⁽⁵⁰⁾ **51**

Figure23: La figure présente une carte illustrative de l'étendue du Wadi Righ. ⁽³⁰⁾ **61**

Figure 24: Conception graphique illustrant la conception de l'expérience du groupe de témoins **63**

Figure 25: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe de rats ayant reçu de l'eau magnétisée à boire. **63**

Figure 26: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe des rats ayant reçu de l'eau traitée au plasma froid. **63**

Figure 27: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe des rats ayant reçu de l'eau magnétisée suivie d'un plasma froid. **64**

Figure 28: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe des rats auxquelles on a administré de l'eau traitée au plasma froid puis magnétisée. **64**

Figure 29: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau magnétisée. **64**

Figure 30: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau traitée au plasma froid. **65**

Figure 31: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau magnétisée puis de plasma froid. **65**

Figure 32: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau traitée au plasma froid puis magnétisée. **65**

Figure 33: La figure illustre le système de connexion expérimental entre le dispositif de magnétisation et le dispositif à plasma froid. **66**

Figure 34: Les images montrent des rats après la sacrifice et le prélèvement de leurs organes. **69**

Figure 35: Les éléments sont enrobés d'un matériau hydrophobe, à savoir de la cire de paraffine, puis congelés pour former des morceaux. **71**

Figure 36: Image du microtome utilisé pour disséquer les organes en vue d'une étude histologique. **72**

Figure 37: L'image illustre les cuves utilisées dans le processus de teinture, qui commence par l'épilation et se termine par la teinture du tissu. **73**

Figure 38: L'image illustre les cuves utilisées dans le processus de teinture, qui commence par l'épilation et se termine par la teinture du tissu. **74**

Figure 39: La figure représente le taux de croissance des souris expérimentales au cours des 21 jours de l'expérience (le groupe A a été arrosé avec de l'eau non traitée, le groupe B a été arrosé avec de l'eau magnétisée, le groupe C a été arrosé avec de l'eau traitée au plasma froid, le groupe D a été arrosé avec de l'eau magnétisée puis au plasma froid, le groupe E a été arrosé avec de l'eau traitée au plasma froid puis à l'eau magnétisée, le groupe F a été arrosé avec de l'eau non traitée mais a été aspergé avec l'eau traitée). **75**

Figure 40: Les résultats de l'analyse du pH mettent en évidence une variation claire en fonction du type de traitement appliqué. L'eau non traitée ($\approx 7,6$) ainsi que l'eau magnétisée ($\approx 7,5$) présentent un caractère légèrement alcalin, ce qui indique que la magnétisation n'entraîne pas de modification significative de l'équilibre acido-basique. En revanche, les échantillons traités au plasma froid, seuls ou en combinaison avec la magnétisation, montrent une diminution marquée du pH ($\approx 3,1-3,3$), traduisant une acidification importante du milieu. Cette évolution est liée à la formation d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (ERN), telles que les acides nitrique et nitreux, générées sous l'effet du plasma. **75**

Figure 41: Les résultats de la conductivité montrent que l'eau non traitée et l'eau magnétisée présentent des valeurs similaires ($\approx 3 \mu\text{S/cm}$), confirmant l'effet limité de la magnétisation. En revanche, la conductivité augmente avec le traitement au plasma froid ($\approx 4 \mu\text{S/cm}$) en raison de la formation d'ions. La valeur maximale est observée lors du double traitement ($\approx 4,8 \mu\text{S/cm}$), traduisant un effet cumulatif, tandis qu'un léger recul ($\approx 3,9 \mu\text{S/cm}$) apparaît lorsque la magnétisation suit le plasma. **76**

Figure 42: Les résultats de turbidité montrent que l'eau magnétisée présente la plus faible valeur ($\approx 0,4 \text{ NTU}$) par rapport à l'eau non traitée ($\approx 0,52 \text{ NTU}$), indiquant une amélioration de la clarté. L'eau traitée au plasma froid affiche une valeur intermédiaire ($\approx 0,47 \text{ NTU}$), suggérant un effet modéré. En revanche, le double traitement entraîne une augmentation notable de la turbidité (jusqu'à $\approx 2,1 \text{ NTU}$), probablement due à la formation de particules ou de complexes en suspension. Ainsi, la combinaison des traitements induit des effets non linéaires sur la turbidité. **76**

Figure 43: Cette figure illustre les résultats des mesures de concentration en ions calcium (Ca^{2+}) dans des échantillons d'eau ayant subi différents traitements. Les résultats montrent une légère diminution de la concentration en calcium après traitement de magnétisation par rapport à l'eau non traitée, tandis qu'une légère augmentation est observée après traitement au plasma froid. Lorsque le traitement de magnétisation est suivi d'un traitement au plasma froid, une augmentation significative de la concentration en calcium est constatée par rapport à tous les autres traitements. Le traitement au plasma froid de l'eau magnétisée donne des valeurs intermédiaires. **76**

Figure 44: Cette figure illustre l'évolution de la dureté totale (TH) de l'eau après différents traitements. La magnétisation a entraîné une diminution de la dureté totale par rapport à l'échantillon non traité, tandis que le traitement au plasma froid a induit une légère augmentation. Des valeurs plus élevées ont également été enregistrées lorsque la magnétisation était combinée au traitement au plasma froid, la dureté totale la plus élevée étant observée dans l'échantillon traité au plasma froid après magnétisation. **77**

Figure 45: Cette figure illustre l'influence de différentes propriétés sur la concentration en ions chlorure (Cl^-) dans l'eau. Les résultats indiquent une légère augmentation de cette concentration après traitement par magnétisation et frittage plasma. La concentration la plus élevée est observée lorsque la magnétisation est combinée au frittage plasma. L'échantillon d'eau traité avec un fluide magnétique et soumis à un frittage plasma à haute concentration présente de meilleurs résultats que l'échantillon d'eau non traité. **77**

Figure 46: Cette figure illustre les résultats des mesures d'alcalinité totale (TAC) d'échantillons d'eau avant et après traitement. Les résultats montrent une grande similarité entre les valeurs d'alcalinité de l'eau non traitée et de l'eau magnétisée, avec une légère augmentation seulement après traitement. En revanche, l'eau traitée au plasma et l'eau magnétisée saturée en plasma, et inversement, présentent des valeurs nulles. **77**

Figure 47: Cette figure illustre l'évolution de la concentration en ions bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau après traitement magnétique, par rapport à l'échantillon témoin. Les résultats montrent une légère augmentation de la concentration en bicarbonate après traitement, tandis que lors des traitements par plasma (magnétisation suivie d'un traitement par plasma, et inversement), les concentrations en ions bicarbonate étaient nulles. **78**

Figure 48: Cette figure illustre l'effet de différents traitements sur la concentration en ions nitrate (NO_3^-) dans l'eau. Les résultats montrent que la concentration en nitrate dans l'eau non traitée et l'eau magnétisée était très faible et similaire, ce qui indique un effet limité de la magnétisation sur cet indicateur. En revanche, le traitement au plasma froid a entraîné une augmentation significative de la concentration en nitrate. Des valeurs élevées ont également été enregistrées pour les coefficients combinés de magnétisation et de plasma froid, la valeur la plus élevée étant observée lorsque l'eau magnétisée était traitée au plasma froid. **78**

Figure 49: Cette figure illustre l'effet de différents traitements sur la concentration en ions nitrite (NO_2^-) dans l'eau. Les résultats montrent que la concentration en nitrite dans l'eau non traitée était très faible, tandis que la magnétisation entraînait une légère augmentation de cette concentration. Une augmentation plus importante a été observée avec le traitement au plasma froid, tandis que le traitement combiné (magnétisation suivie d'un traitement au plasma froid) a donné une valeur similaire. La concentration en nitrite la plus élevée a été enregistrée dans l'échantillon traité au plasma froid après magnétisation. **79**

Figure 50: Cette figure illustre l'évolution de la concentration en ions ammonium (NH_4^+) dans l'eau après différents traitements. Les résultats montrent une absence ou une diminution significative de la concentration en ammonium dans l'échantillon non traité, tandis que la magnétisation entraîne une légère augmentation. Une augmentation plus importante est observée après traitement au plasma froid, les valeurs les plus élevées étant enregistrées dans les échantillons ayant subi une magnétisation simultanée au traitement au plasma froid, indépendamment de l'ordre d'application. **79**

Figure 51: Cette figure illustre l'effet de différents traitements sur la concentration en ions phosphate (PO_4^{3-}). Les résultats montrent une forte similarité entre les échantillons non traités et magnétisés, ce qui indique un effet limité de la magnétisation sur la concentration en phosphate. En revanche, l'utilisation d'un plasma froid a entraîné une augmentation significative de la concentration en phosphate par rapport à l'échantillon témoin. Cette augmentation a également été observée avec les traitements combinés, bien qu'à des degrés variables. **80**

Figure 52: Cette figure illustre les valeurs de résidu sec dans les échantillons étudiés après différents traitements. Les résultats montrent une légère diminution de la valeur de résidu sec après traitement magnétique par rapport à l'échantillon non traité, tandis qu'une augmentation significative a été enregistrée après traitement au plasma froid et après traitement combiné magnétique et plasma. Cette augmentation indique une hausse de la quantité totale de substances hydrosolubles, résultant de l'effet du traitement sur l'équilibre ionique de la solution. **80**

Figure 53 : Taux d'hémoglobine chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **83**

Figure 54: Taux de globules blancs chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **84**

Figure 55: Taux de plaquette chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **86**

Figure 56: Taux de créatinine chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **87**

Figure 57: Taux d'Urée chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **88**

Figure 58: Taux de TGO chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation **90**

Figure 59: Taux de TGP chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **91**

Figure 60: Taux de cholestérol chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de

21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **93**

Figure 61: Taux des triglycérides chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **95**

Figure 62: Taux du LDL chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **97**

Figure 63: Taux des HDL chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **99**

Figure 64: Taux de la protéine C-réactive (CRP) chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **101**

Figure 65: Taux de glycémie chez des groupes de souris ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation, sur une période de 21 jours. Les groupes sont : a) Témoin, b) Groupe de magnétisation, c) Groupe de plasma froid, d) Groupe de magnétisation suivi de plasma froid, e) Groupe de plasma froid suivi de magnétisation et f) Groupe de pulvérisation. **102**

Figure 66: Examen microscopique du tissu hépatique (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez la souris : A) Témoin- B) Ingestion d'eau magnétisée- C) Ingestion d'eau traitée au plasma froid- D) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / E) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / F) Groupe pulvérisation. **104**

Figure 67: Examen microscopique de tissu rénal (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez la souris : A) Témoin / B) Consommation d'eau magnétisée / C) Consommation d'eau traitée au plasma froid / D) Consommation d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / E) Consommation d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / F) Groupe pulvérisation. **106**

Figure 68: Examen microscopique du tissu cardiaque (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez la souris : A) Témoin / B) Ingestion d'eau magnétisée / C) Ingestion d'eau traitée au plasma froid / D) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / E) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / F) Groupe pulvérisation. **108**

Figure 69: Examen microscopique de tissu cérébral (Grossissement $\times 100$) après coloration à l'hématoxyline-éosine chez la souris : A) Témoin / B) Ingestion d'eau magnétisée / C) Ingestion d'eau traitée au plasma froid / D) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / E) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid / F) Groupe traité par pulvérisation. **110**

Figure 70: Examen microscopique de tissu cutané (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez la souris : A) Témoin B) Ingestion d'eau magnétisée C) Ingestion d'eau traitée au plasma froid D) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid E) Ingestion d'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid F) Groupe pulvérisation. **112**

Figure 71: Cette figure présente la concentration moyenne de magnésium (Mg) dans le foie, les reins et le cœur. Les résultats ont montré des valeurs similaires dans les trois organes, la moyenne la plus élevée étant enregistrée dans les reins et la plus faible dans le cœur. Cependant, le test de Tukey a révélé que toutes les moyennes appartenaient au même groupe statistique (la lettre « A »), indiquant l'absence de différences statistiquement significatives entre les organes au seuil de signification de 0,05. **114**

Figure 72: Cette figure présente la concentration moyenne en fer (Fe) dans le foie, les reins et le cœur. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les reins, suivies par le cœur, tandis que la concentration la plus faible a été observée dans le foie. Malgré ces différences numériques, le test de Tukey a montré que toutes les moyennes étaient de même grade (A), indiquant l'absence de différences statistiquement significatives entre les organes étudiés au seuil de signification de 0,05. Par ailleurs, les valeurs élevées de l'écart type, notamment dans les reins et le cœur, reflètent une variabilité intra-échantillon, ce qui peut expliquer l'absence de signification statistique claire. **116**

Figure 73: Cette figure présente la concentration moyenne de calcium (Ca) dans le foie, les reins et le cœur, ainsi que les écarts-types et les résultats du test de Tukey ($p < 0,05$). Les résultats indiquent une tendance à une concentration de calcium plus élevée dans le cœur, suivie par les reins, puis le foie. Cependant, la présence de la lettre (a) au-dessus de chaque barre indique l'absence de différence statistiquement significative entre les organes étudiés ($p > 0,05$). **118**

Tableau01: variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température.	5
Tableau02: Point d'ébullition de l'eau⁽⁴⁵⁾	5

Liste des abréviations

Abréviation	Signification	Unité
E	Énergie	Joule (J)
q	Charge électrique	Coulomb (C)
V	Tension électrique	Volt (V)
e⁻	Électron	—
A	Atome neutre	—
A⁺	Ion positif	—
A*	Atome excité	—
h	Constante de Planck	J·s
v	Fréquence	Hz
k	Constante de Boltzmann	J/K
T_e	Température des électrons	Kelvin (K)
T_g	Température du gaz	Kelvin (K)
n_e	Densité électronique	m ⁻³
N	Nombre de particules	—
V (volume)	Volume	m ³ ou L
λD	Longueur de Debye	m
ε₀	Permittivité du vide	F/m
σ	Conductivité électrique	μS/cm
ρ	Résistivité	Ω·cm
pH	Potentiel hydrogène	—
C	Concentration	mol/L
n	Nombre de moles	mol
B	Induction magnétique	Tesla (T)
μ	Perméabilité magnétique	H/m
H	Champ magnétique	A/m
TC	Taux de croissance	g/jour ou unité/temps
PF	Poids final	g
PI	Poids initial	g
t	Temps	jour / seconde
RONs	Espèces réactives de l'oxygène et de l'azote	—
O₂⁻	Superoxyde	—
OH·	Radical hydroxyle	—
H·	Radical hydrogène	—
NO_x	Oxydes d'azote	—
EC	Electrical Conductivity	μS/cm

Introduction

Générale

Introduction:

L'eau constitue l'une des ressources naturelles vitales les plus importantes sur Terre, occupant une place centrale aux niveaux environnemental et agricole à l'échelle mondiale. Elle est un élément essentiel à la pérennité des écosystèmes, contribuant à la régulation du climat, au maintien de la biodiversité et à l'équilibre écologique⁽²⁴⁾. Elle joue également un rôle déterminant dans le secteur agricole, où elle est indispensable à l'ensemble des activités, notamment l'irrigation des cultures et l'élevage, ce qui en fait un facteur clé de la sécurité alimentaire mondiale et de la durabilité de la production agricole ⁽²⁰⁾.

L'importance de l'eau ne se limite pas aux domaines environnemental et agricole, mais s'étend à l'ensemble des aspects de la vie humaine. Elle constitue un élément fondamental pour l'amélioration de la qualité de vie, en contribuant à la préservation de la santé publique, à l'hygiène et au développement économique et social ⁽⁵³⁾. Elle participe également à l'amélioration de la production agricole et animale, en favorisant la croissance des plantes, en augmentant les rendements et en maintenant la santé des organismes vivants, ce qui reflète son rôle essentiel dans la sécurité alimentaire ⁽²⁰⁾.

Compte tenu de cette importance globale, le rôle de l'eau s'étend à l'échelle microscopique au sein des organismes vivants, où elle constitue le milieu dans lequel se déroulent les réactions biochimiques indispensables à la vie. Elle représente une proportion importante de la masse cellulaire et intervient dans le transport des nutriments et des ions, l'activation des processus métaboliques, le maintien de l'équilibre osmotique et de la température, ainsi que dans la régulation de l'activité enzymatique et la stabilité structurale des protéines ⁽³⁵⁾. Dans ce contexte, l'intérêt croissant pour l'amélioration de la qualité de l'eau a conduit au développement de techniques modernes visant à modifier ses propriétés afin de répondre aux exigences environnementales, agricoles et sanitaires.

Dans cette perspective, la magnétisation de l'eau est apparue comme une technique innovante reposant sur l'exposition de l'eau à un champ magnétique, induisant des modifications de ses propriétés physico-chimiques. Certaines études suggèrent que ce procédé pourrait réorganiser les liaisons hydrogène entre les molécules d'eau, réduire la tension superficielle et améliorer la solubilité des sels et des minéraux ⁽³⁶⁾. Ces effets pourraient favoriser le transport des nutriments dans les systèmes biologiques, notamment en agriculture, où une amélioration de la germination, de la croissance des plantes et de l'absorption des éléments nutritifs a été observée. De plus, cette technique pourrait limiter la formation de dépôts dans les systèmes d'irrigation. Toutefois, son efficacité reste discutée, certaines études indiquant que ces effets peuvent être limités ou instables selon les conditions d'application ⁽²⁵⁾.

Parallèlement, la technologie de la plasma froid représente une approche avancée dans le traitement de l'eau. Elle repose sur la génération d'un gaz ionisé à basse température contenant des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (RONS), ainsi que des rayonnements ultraviolets et des particules chargées ⁽¹¹⁾. Cette technique se distingue par sa capacité à désinfecter l'eau sans recours à des produits chimiques, ce qui en fait une solution

prometteuse pour améliorer la qualité de l'eau potable et agricole. Elle peut également contribuer à la dégradation de certains polluants organiques et à l'amélioration des propriétés chimiques de l'eau. Toutefois, elle peut induire des modifications du pH ou augmenter la concentration des espèces réactives, ce qui nécessite un contrôle rigoureux des conditions d'utilisation.

Malgré ces avancées technologiques, l'expansion industrielle et l'exploitation excessive des ressources naturelles, notamment l'eau, ont entraîné une dégradation de sa qualité ⁽⁵²⁾. Cette dégradation se manifeste par des altérations des propriétés physico-chimiques et biologiques de l'eau, telles que la conductivité électrique, le pH et la concentration en polluants, affectant ainsi les sols, les organismes vivants et la durabilité des écosystèmes ⁽¹⁶⁾.

Dans ce contexte, un débat scientifique persiste quant aux effets des techniques modernes, telles que la magnétisation et le plasma froid, sur les propriétés de l'eau. Ces traitements peuvent influencer divers paramètres, notamment l'équilibre chimique, l'activité biologique et les propriétés de solubilité. Si certaines études mettent en évidence des effets positifs, comme l'amélioration de la croissance des plantes et la réduction de la charge microbienne, d'autres soulignent la variabilité ou l'instabilité de ces effets, ainsi que le risque de perturbations des équilibres biologiques ⁽²⁵⁾.

Ainsi, l'étude approfondie de ces technologies apparaît essentielle afin de mieux comprendre leurs mécanismes d'action et d'évaluer leur efficacité dans l'amélioration de la qualité de l'eau, tout en garantissant une utilisation durable respectueuse des systèmes biologiques et environnementaux.

Quel est l'effet de l'activation de l'eau par un système biophysique double reposant sur la magnétisation et le plasma froid sur les propriétés de l'eau, et comment ces modifications se répercutent-elles sur la réponse métabolique et la biotoxicité dans un modèle biologique étudié?

La première partie de ce manuscrit est consacrée à la présentation des données bibliographiques relatives au sujet et se compose de quatre chapitres :

Chapitre 1 : Généralité sur l'eau

Ce chapitre explore les concepts fondamentaux de l'eau, notamment sa définition, ses propriétés physiques et chimiques, et son importance environnementale vitale, en soulignant son rôle dans les systèmes naturels et les organismes vivants. Il examine également sa composition et le rôle de ses composants dans la détermination de son comportement et de sa qualité, ce qui en fait un élément essentiel au maintien de la vie.

Chapitre 2 : Concepts généraux concernant l'eau magnétisée

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de la magnétisation et les propriétés physico-chimiques de l'eau magnétisée. Nous avons également abordé les notions générales relatives aux aimants et aux champs magnétiques.

Chapitre 3 : Plasma et plasma froid

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts fondamentaux de la technologie du plasma froid, son impact sur l'eau et ses applications dans divers domaines de la vie.

Chapitre 4 : Métabolisme et biotoxicité

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts généraux du métabolisme et ses différentes voies. Nous avons également présenté les concepts généraux de biotoxicité et le mécanisme d'action des toxines dans l'organisme, ainsi que l'interaction entre métabolisme et biotoxicité.

La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes utilisés lors de la réalisation de ce travail expérimental.

La troisième partie de ce manuscrit présente et analyse les résultats obtenus. Enfin, cette thèse se conclut par un résumé mettant en évidence les résultats les plus importants et leurs implications.

Partie théorique

Chapitre 01:

Généralité sur l'eau

1. Définition et historique de l'eau:

Depuis l'Antiquité, l'homme s'interroge sur la nature de l'eau. Considérée par Aristote comme l'un des quatre éléments fondamentaux, l'eau a longtemps été expliquée selon une vision philosophique, jusqu'à ce que les travaux scientifiques du XVIII^e siècle viennent bouleverser ces conceptions. En 1766, Cavendish démontra que l'eau était constituée d'hydrogène, suivi par la découverte de l'oxygène par Priestley en 1774. La synthèse de l'eau fut réalisée en 1783 par Lavoisier et Laplace, puis son analyse par électrolyse en 1800 par Carlisle et Nicholson, permettant d'établir sa formule chimique H₂O.⁽¹³⁾

L'eau (aqua en latin, hydros en grec) est un composé chimique liquide dans les conditions standards, essentiel à la vie. Constituant jusqu'à 97 % de certains organismes, elle joue un rôle fondamental tant sur le plan mécanique, via la pression hydrostatique, que chimique, en tant que solvant facilitant les réactions métaboliques. La présence d'eau liquide est ainsi un critère majeur de l'habitabilité des milieux et de l'émergence de la vie.⁽²²⁾

En raison de ses propriétés physiochimiques particulières, l'eau joue un rôle central dans les équilibres écologiques et biologique.

2. Propriétés physicochimiques de l'eau:

L'eau se caractérise par un ensemble de propriétés physiques et chimiques qui expliquent son importance majeure dans les systèmes biologiques et environnementaux. Ce volet abordera ces propriétés de manière détaillée, en présentant chacune d'elles séparément et en mettant en évidence son rôle dans le soutien des processus vitaux et la stabilité du milieu naturel.

2.1. Propriétés physiques de l'eau :

Sur Terre, l'eau se distingue par une présence particulièrement marquée à l'état liquide et se caractérise par les principales propriétés physiques suivantes:

2.1.1. masse volumique:

Par tassement progressif de l'édifice moléculaire, la masse volumique varie avec la température et la pression.

Pour l'eau pure sous pression normale, elle passe par un maximum à environ 4 °C (exactement 3,982 °C) et sa variation en fonction de la température est la suivante⁽⁴⁵⁾ (tableau 1) :

Tableau01: variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température.⁽⁴⁵⁾

T°C	Masse Volumique KG.dm3	T°C	Masse Volumique KG.dm3
0	0,999839	20	0,998204
4	0,999972	25	0,997045
10	0,999699	30	0,995647
15	0,999099	100	0,958365

Cette propriété de l'eau entraîne diverses conséquences, aussi bien dans la nature (phénomènes de stratification des lacs) que dans les stations de traitement (ex. : remontées de boues dans les décanteurs).

Aux pressions rencontrées en pratique hydraulique, l'eau est considérée comme un fluide incompressible. Mais, en fait, c'est un fluide légèrement élastique : son volume décroît d'environ 0,048 % chaque fois que la pression augmente d'une atmosphère.

L'eau de mer, de salinité $35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, a une masse volumique moyenne de $1,028 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ à 0°C ; une variation de salinité de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ fait varier la masse volumique de $0,0008 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$.⁽⁴⁵⁾

2.1.2. Point d'ébullition:

Le point d'ébullition est la température à laquelle un liquide commence à bouillir et se transforme en vapeur, également connue sous le nom de température de saturation.

Au niveau de la mer, l'eau bout à 212°F (100°C). Si la pression environnante diminue, la température nécessaire pour faire bouillir l'eau diminue également. À l'inverse, si la pression augmente, la température requise pour l'ébullition augmente aussi.

Le point d'ébullition d'un liquide augmente avec la pression et diminue lorsque la pression diminue. Le tableau ci-dessous présente le point d'ébullition de l'eau à différentes pressions. Notez que la température nécessaire pour faire bouillir l'eau augmente progressivement avec l'augmentation de la pression.⁽⁴⁵⁾

Tableau02: Point d'ébullition de l'eau⁽⁴⁵⁾

Point d'ébullition de l'eau			
Unités impérial		Unités métriques	
Pression (psia)	Température (°F)	Pression (bara)	Température (°C)
14,7	212	1,0	100
30,0	250	2,1	121
45,0	275	3,1	135
60	293	4,1	145

2.1.3. viscosité:

La viscosité est la propriété d'un fluide de résister aux mouvements internes ou à l'écoulement, en raison des frottements entre ses molécules. Elle est à l'origine des pertes de charge et joue un rôle important en traitement de l'eau.

On distingue la viscosité dynamique (μ), définie comme le rapport entre la contrainte de cisaillement T (Pa) et le gradient de vitesse dV/dy , perpendiculaire au plan de glissement :

$$\mu = T / (dV/dy). \quad (45)$$

La viscosité de l'eau diminue lorsque la température augmente, augmente avec la salinité et présente un comportement particulier sous l'effet de la pression. La viscosité cinématique est définie par la relation :

$$\nu = \mu / \rho. \quad (45)$$

2.1.4. Les enthalpies ou Chaleur latente:

Les enthalpies de transformation sont pour la fusion de $334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (ou $6,01 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) et pour la vaporisation de $2\,259 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (ou $40,657 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) à la pression normale et à 100°C .

L'importance de la chaleur massique et de l'enthalpie de vaporisation fait que les grandes étendues d'eau à la surface de la terre constituent de véritables volants thermiques. C'est également la raison de l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur. ⁽⁴⁵⁾

2.1.5. Capacité thermique:

Très élevée pour un liquide, elle vaut $4,18 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ou $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ (soit $1 \text{ kcal} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ dans les anciennes unités) à 20°C . Elle varie avec la température en présentant un minimum de $4,178 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ à 30°C , pour remonter à $4,215 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ à 100°C . ⁽⁴⁵⁾

2.1.6. conductivité électrique de l'eau:

L'eau est légèrement conductrice. La conductivité de l'eau la plus pure que l'on ait obtenue est de $4,2$ microsiemens par mètre à 20°C (correspondant à une résistivité de $23,8$ mégohms-centimètres). Elle augmente lorsque des sels sont dissous dans l'eau et elle varie en fonction de la température. ⁽⁴⁵⁾

2.2. Propriétés chimiques de l'eau:

Les propriétés chimiques de l'eau décrivent son comportement lors des réactions chimiques et sa capacité à interagir avec d'autres substances. Ces propriétés incluent notamment le pH, le potentiel d'oxydoréduction (ORP), et sa réactivité vis-à-vis des acides, des bases et des sels dissous.

L'eau est un excellent solvant qui dissout un très grand nombre de sels, de gaz, de molécules organiques. Les réactions chimiques de la vie se passent en milieu aqueux; les organismes sont très riches en eau (jusqu'à plus de 90%). Elle a longtemps été considérée comme un solvant neutre intervenant peu ou pas dans les réactions chimiques. La dilution dans l'eau permettait en particulier de ralentir l'activité des réactifs. En fait, l'eau est un agent chimique très agressif qui risque d'attaquer les parois du récipient qui la contient: dans un flacon en verre, des ions silicium passent dans l'eau. L'eau pure peut exister du point de vue réglementaire, c'est à dire eau sans contaminants bactériens et chimiques, mais elle n'existe

pratiquement pas du point de vue chimique: même l'eau distillée contient des traces d'ions ou de molécules organiques prélevées aux conduites et aux récipients.

Dans les réactions chimiques, l'eau intervient d'abord par sa dissociation en protons H^+ , souvent associés à H_2O pour former des protons hydratés H_3O^+ , et en ions hydroxyle OH^- . C'est le rapport entre ces 2 types d'ions qui détermine le pH de la solution (pH: logarithme de l'inverse de la concentration molaire en H^+). De nombreux métaux peuvent décomposer l'eau en produisant un dégagement d'hydrogène et un hydroxyde métallique.⁽¹⁸⁾

2.2.1. La dissolution des ions:

La dissolution des ions (sels, acides, bases) est une conséquence du caractère polaire de l'eau. La concentrations des ions d'un sel caractérise le produit de solubilité. Les sels ont des valeurs de produit de solubilité différente, ce qui explique le phénomène de cristallisation fractionnée au cours de l'évaporation d'une solution saline. Dans les marais salants, l'eau de mer dépose d'abord le carbonate de calcium, le sulfate de calcium, puis le chlorure de sodium et enfin les sels très solubles comme ceux de potassium, les iodures et les bromures.⁽¹⁸⁾

2.2.2. L'oxydoéduction:

Les phénomènes d'oxydoréduction sont essentiels dans le traitement de l'eau dès que des éléments capables de changer de valence (C, N, S, Fe, Mn, Cr, As, Cl, O₃...) sont impliqués. L'eau peut agir comme donneur d'électrons (réductrice) ou accepteur d'électrons (oxydante), mais les réactions sont lentes sans catalyseurs et souvent négligeables.

La force d'un couple redox Ox/Red est définie par rapport à l'électrode standard à hydrogène (ESH) :

Ox/Red : couple redox

Relation de Nernst :

$$\frac{ox}{red} \ln \frac{RT}{nF} {}^\circ E = E$$

où (F) est la constante de Faraday, (R) celle des gaz parfaits, et (E°) le potentiel standard. Pour qu'une réaction entre deux couples soit possible :

$${}_2E^\circ < {}_1E^\circ$$

Certaines réactions impliquent des protons ou ions hydroxydes ; leur domaine de stabilité est représenté par le diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix). À 25 °C, l'équation de Nernst s'écrit :

$$pH 0.59 + \frac{Red}{Ox} \log \frac{0.59}{n} - {}^\circ E = E$$

Le potentiel varie linéairement avec le pH et les concentrations, et les droites tracées pour chaque couple délimitent les zones de stabilité thermodynamique des espèces chimiques (solides, gazeuses ou en solution).⁽⁴⁵⁾

2.2.3. pH:

Le pH des eaux naturelles est couramment mesuré sur le terrain dans le cadre des études de qualité de l'eau menées par l'USGS. De nombreux processus chimiques aquatiques, tels que la spéciation chimique, la solubilité des minéraux et des gaz, l'échange d'ions à la surface des minéraux et la cinétique des réactions, varient en fonction du pH.

Le pH des eaux de surface est influencé de manière journalière par la photosynthèse et la respiration des algues et des macrophytes enracinés (Hem, 1989). De plus, le pH affecte directement les fonctions physiologiques des organismes aquatiques et constitue un indicateur important de la santé d'un système aquatique.

Le pH de l'eau est défini comme le logarithme décimal négatif de l'activité des ions hydrogène $[H^+]$:

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

et, par définition :

$$[H^+] = 10^{-pH}$$

où $[H^+]$ représente l'activité de l'ion hydrogène.⁽²³⁾

2.3. Propriétés biologiques de l'eau:

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des êtres vivants .

Il existe un cycle biologique, au cours duquel s'effectue une série d'échanges grâce à l'eau. Celle-ci est le constituant principal (en **volume**) des êtres vivants (voir quelques chiffres dans l'introduction de cet article), et plus particulièrement du protoplasme de toutes les cellules. L'eau compose aussi la plus grande partie de nos aliments (70 à 95 % de la plupart de nos viandes et de nos fruits et légumes).

Il est donc évident que « l'eau, c'est la vie », mais il convient de préciser quelques-unes des multiples relations qui existent entre elle et les êtres vivants.⁽⁴⁶⁾

2.3.1. La vie dans l'eau:

Nous avons vu, au long de cet article, les diverses caractéristiques de l'eau (souvent des anomalies) qui se révélaient favorables à la vie sur Terre : zone de stabilité de l'eau liquide dans le diagramme de phase conforme aux conditions terrestres ; densité plus faible de la glace ; liaison hydrogène (avec un maximum d'activité entre 27 et 37 °C, correspondant à la température des animaux à sang chaud) ; propriétés thermiques (exerçant un rôle régulateur favorable dans le milieu et dans les organismes) ; tension superficielle permettant certains déplacements à la surface de l'eau ainsi que la montée de la sève dans les végétaux par capillarité ; aptitude à la dissolution et à l'ionisation, etc.

Il y a 3,8 milliards d'années, c'est donc dans l'eau, ou plutôt dans une « soupe chaude primitive » (Haldane) suivant l'hypothèse...⁽⁴⁶⁾

3.Cycle hydrologique de l'eau:

Le cycle de l'eau se définit comme le mouvement continu de l'eau dans la nature entre les océans, les terres émergées et l'atmosphère, au cours duquel elle change d'état physique sans perte de sa quantité, formant ainsi un système circulaire et intégré sans début ni fin. Ce cycle s'effectue à travers un ensemble de processus naturels interconnectés qui se déroulent simultanément, et l'on distingue deux types principaux : le grand cycle de l'eau et le petit cycle de l'eau, selon le trajet suivi par l'eau et l'étendue de son parcours. Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau s'évapore des océans et des terres, puis pénètre dans l'atmosphère, où le refroidissement des masses d'air humides entraîne la condensation de la vapeur d'eau et la formation des nuages, en présence de noyaux de condensation. L'eau est ensuite temporairement stockée dans l'atmosphère avant de retomber sur la surface terrestre sous forme de précipitations. Une partie de cette eau est interceptée par la végétation, tandis que le reste atteint le sol, où elle peut s'évaporer, s'écouler en surface vers les cours d'eau ou s'infiltrer dans le sous-sol. L'eau infiltrée contribue à l'humidité du sol et aux nappes souterraines, qui peuvent réapparaître à la surface via les sources et les rivières. Le cycle se complète par l'évaporation de l'eau du sol et des plans d'eau, ainsi que par la transpiration des plantes, assurant ainsi la continuité du cycle hydrologique.⁽¹³⁾

3.1.Évaporation:

Il s'agit du processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état de vapeur d'eau en absorbant l'énergie thermique du rayonnement solaire. Ce phénomène se produit principalement à la surface des étendues d'eau telles que les mers, les lacs et les rivières, ainsi qu'à la surface des sols humides. Ce processus constitue la première étape du cycle hydrologique, responsable du transport de l'eau vers l'atmosphère⁽¹³⁾.

3.2.Condensation:

Il s'agit du processus par lequel la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère se transforme en gouttelettes d'eau liquide ou en cristaux de glace en raison d'une baisse de température ou d'une augmentation de la saturation. Ces gouttelettes s'accumulent pour former des nuages ou du brouillard, et ce processus est fondamental pour la formation des précipitations au sein du cycle hydrologique⁽¹³⁾.

3.3.Précipitations :

Il s'agit de la chute d'eau de l'atmosphère vers la surface de la Terre sous différentes formes telles que la pluie, la neige ou la grêle. Ce phénomène se produit lorsque les gouttelettes d'eau contenues dans les nuages deviennent suffisamment lourdes pour vaincre la force des courants ascendants. Il s'agit du principal moyen par lequel l'eau retourne de l'atmosphère à la surface de la Terre⁽¹³⁾.

3.4. Infiltration :

Ce processus désigne la pénétration de l'eau de surface dans le sol à travers les pores et les fissures de la roche. L'eau se dirige ensuite vers les aquifères pour reconstituer les réserves d'eau souterraines. Ce processus dépend des propriétés du sol, telles que sa perméabilité, son taux d'humidité et sa structure géologique ⁽¹³⁾.

3.5. Ruissellement :

Il s'agit du mouvement de l'eau à la surface de la Terre lorsque le sol ne peut plus l'absorber entièrement. L'eau s'écoule alors vers les dépressions, les rivières et autres étendues d'eau. Ce processus joue un rôle essentiel dans le transport de l'eau, des matières dissoutes et des sédiments au sein de l'écosystème ⁽¹³⁾.

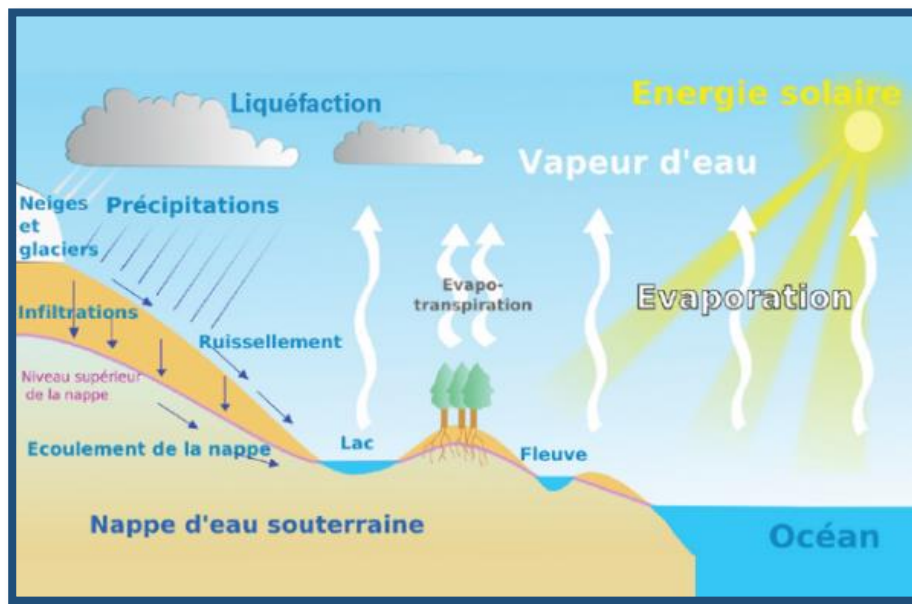


Figure01: cycle de l'eau. (Anonyme01)

4. L'importance de l'eau:

L'eau est l'une des ressources les plus essentielles de la planète. La vie ne peut pas exister sans l'eau. L'eau occupe une place essentielle dans les systèmes biologiques et environnementaux en raison de ses Propriétés physicochimiques particulières. L'eau possède plusieurs propriétés uniques qui en font une ressource précieuse. Certaines de ces propriétés sont mentionnées ci-dessous:

- **L'eau est un bon solvant:** elle peut dissoudre de nombreuses substances
- **Les points d'ébullition et de congélation de l'eau la rendent disponible dans ses trois états :** solide, liquide et gazeux.
- **La chaleur spécifique** de l'eau est très élevée, ce qui lui permet d'absorber et de libérer la chaleur, régulant ainsi la température de son environnement.
- **La transparence de l'eau** permet à la lumière de pénétrer jusqu'aux formes de vie immergées. Ceci est essentiel à la survie des plantes dans les océans, les lacs et les rivières.

- **L'eau n'est ni acide ni alcaline.** Elle a un pH de 7, ce qui en fait une substance neutre

Ces propriétés uniques de l'eau, associées à son abondance sur la planète (environ 71 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau), en font une ressource vitale pour les plantes, les animaux et les êtres humains.

❖ **Importance biologique:**

L'importance biologique de l'eau réside dans son rôle de principal milieu où se déroulent la plupart des réactions biochimiques au sein des organismes vivants. Grâce à sa forte capacité à dissoudre les composés organiques et inorganiques, elle permet la dynamique des réactions enzymatiques et des processus métaboliques, assurant ainsi la continuité des fonctions cellulaires ⁽³⁵⁾. L'eau joue également un rôle essentiel dans le transport des biomatériaux, facilitant la circulation des nutriments, des gaz et des déchets à travers les biofluides. De plus, elle contribue au maintien de l'équilibre interne de l'organisme, notamment par la régulation de la température grâce à sa capacité thermique élevée ⁽²⁵⁾.

Par ailleurs, l'eau contribue au maintien de l'équilibre osmotique et du volume cellulaire, et influence directement la stabilité de la structure tridimensionnelle des biomolécules telles que les protéines et les acides nucléiques, garantissant leur bon fonctionnement. Son importance s'étend au niveau écologique, où elle constitue un milieu essentiel à la vie des organismes aquatiques et contribue à la régulation des cycles biogéochimiques. D'autre part, la qualité de l'eau est un facteur crucial de santé publique, car toute modification de ses propriétés peut entraîner des perturbations biologiques, comme le confirment les normes internationales relatives à l'eau potable ⁽²⁵⁾.

❖ **Importance environnementale:**

L'importance environnementale de l'eau est manifeste dans son rôle essentiel pour la continuité et l'équilibre des écosystèmes. Elle fournit l'habitat aux organismes aquatiques et contribue au transfert d'énergie et de matière à travers les chaînes alimentaires ⁽²⁵⁾. Elle joue également un rôle crucial dans la régulation du climat grâce aux processus d'évaporation et de condensation, qui contribuent à la distribution de la chaleur et à la stabilisation des conditions environnementales.

L'eau est aussi un élément central des cycles biogéochimiques, transportant les éléments chimiques entre le sol, l'atmosphère et les organismes vivants. De plus, elle contribue au maintien de la fertilité des sols en dissolvant les sels minéraux et en facilitant leur absorption par les plantes ⁽²⁵⁾.

La détérioration de la qualité de l'eau ou sa raréfaction entraînent des déséquilibres écologiques et une perte de biodiversité, faisant de sa protection et de sa gestion durable une priorité environnementale mondiale ⁽²⁵⁾.

❖ **Importance agricole et industrielle:**

L'importance de l'eau en agriculture réside dans son rôle déterminant pour la production agricole et sa durabilité. Elle est essentielle à la germination, à la croissance des plantes et à

la réalisation des réactions vitales, notamment la photosynthèse et l'absorption des minéraux du sol. L'eau contribue également au transport des nutriments dans les tissus végétaux et maintient la turgescence, assurant ainsi la résilience et la droiture des plantes. De plus, la disponibilité, la quantité et la qualité de l'eau ont un impact direct sur les rendements et la qualité des cultures. Toute carence ou pollution peut entraîner une baisse de la production ou une détérioration des caractéristiques agricoles, soulignant son rôle crucial pour la sécurité alimentaire ⁽²⁰⁾.

D'un point de vue industriel, l'eau est une ressource fondamentale dans divers procédés de production. Elle est utilisée comme solvant et milieu réactionnel dans l'industrie chimique et comme agent réfrigérant dans de nombreuses installations industrielles grâce à sa capacité thermique élevée, protégeant ainsi les équipements et assurant une production continue. L'eau est également utilisée dans les procédés de nettoyage, d'extraction et de transport de matériaux, en plus de son rôle dans la production d'énergie, notamment dans les centrales thermiques et hydroélectriques. La qualité de l'eau affecte directement l'efficacité des processus industriels et la qualité des produits finaux, ce qui nécessite un traitement et une surveillance de l'eau selon des normes précises afin d'éviter la corrosion, la sédimentation ou la pollution industrielle ⁽²⁵⁾.

5. Composition de l'eau

L'eau absolument pure ne contient que la molécule H_2O . Elle n'existe pas dans la nature, et son absence de minéralisation la rend mauvaise pour la santé.

Les eaux naturelles contiennent des substances dissoutes, principalement des sels minéraux provenant des couches géologiques que l'eau a traversées. Pour être propre à la consommation, l'eau doit contenir un peu de sels minéraux. Le corps humain est arrangeant : il accepte une très grande variation de composition d'eau (voir la table sur ma page principale). Nos cellules et notre sang contiennent des électrolytes (des sels). Une eau complètement déminéralisée (ou de l'eau distillée) est mauvaise, car un phénomène "osmotique" conduirait les sels de nos cellules ou de notre sang à migrer dans l'eau, réduisant ainsi leur concentration normale dans notre corps.

5.1. Les sels minéraux:

Ils sont constitués de cations (chargés positivement) et d'anions (chargés négativement) dissous dans l'eau, dont les principaux sont:

- Le calcium Ca^{2+}
- Le magnésium Mg^{2+}
- Le sodium Na^{+}
- Le potassium K^{+}
- Le bicarbonate HCO_3^{-} (appelé aussi hydrogénocarbonate)
- Le sulfate SO_4^{2-}
- Le chlorure Cl^{-}
- Le nitrate NO_3^{-}
- Le fluorure F^{-}

Les ions ci-dessus sont bénéfiques ou neutres. Leur concentration varie entre quelques mg/L et quelques centaines de mg/L. Seuls les deux derniers ne devraient pas être présents à forte concentration. C'est surtout le cas du fluorure. Le nitrate est inoffensif pour l'homme adulte, mais peut créer de graves problèmes chez le nourrisson.⁽⁴⁶⁾

5.2. Gaz dissous:

L'eau contient divers gaz dissous d'une importance environnementale et biologique considérable, notamment l'oxygène (O₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et l'azote (N₂). L'oxygène dissous est vital pour les organismes aquatiques, car il intervient dans la respiration cellulaire et constitue un indicateur important de la qualité de l'eau. Le dioxyde de carbone joue un rôle clé dans la régulation de l'équilibre acido-basique (pH) par la formation d'acide carbonique et participe également à la photosynthèse des plantes aquatiques. L'azote, bien que relativement inerte, contribue à l'équilibre gazeux de l'eau. Les concentrations de ces gaz sont influencées par plusieurs facteurs, tels que la température, la pression, l'activité biologique et les mouvements de l'eau, ce qui en fait des indicateurs essentiels pour évaluer l'état environnemental de l'eau⁽⁴⁶⁾.

5.3. Matières organiques et micro-organisme:

Les composants organiques des eaux naturelles comprennent une grande variété de composés issus de la décomposition de matières organiques ou d'activités humaines, tels que les acides organiques, les protéines, les glucides et les lipides. Ces substances jouent un rôle crucial dans l'équilibre écologique en servant de source d'énergie aux micro-organismes et en influençant directement les propriétés chimiques de l'eau, comme la demande biochimique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO). Cependant, des concentrations élevées peuvent entraîner une diminution de l'oxygène dissous et une pollution organique, impactant négativement les écosystèmes aquatiques⁽⁴⁶⁾.

Les composants organiques des eaux naturelles comprennent des acides organiques, des protéines, des glucides et des lipides. Dans ce contexte, ces matières organiques sont associées à la présence de micro-organismes tels que des bactéries, des virus, des algues et des protozoaires, qui contribuent aux processus de décomposition et de recyclage de la matière organique dans le milieu aquatique. Cependant, certains de ces micro-organismes peuvent être pathogènes et présenter un risque pour la santé publique. Certains sont également utilisés comme bioindicateurs pour évaluer la qualité de l'eau, comme les coliformes, indicateurs de contamination fécale. Leur abondance est affectée par de multiples facteurs environnementaux tels que la température, la disponibilité des nutriments et le niveau d'oxygène, ce qui rend leur surveillance essentielle pour garantir la sécurité et la qualité de l'eau⁽²⁴⁾.

Chapitre 02 :

*Concepts généraux concernant
l'eau magnétisée*

L'eau constitue le milieu fondamental des réactions physico-chimiques et biologiques dans les systèmes vivants, ce qui justifie l'intérêt porté à la modification de ses propriétés. Les champs magnétiques peuvent induire des changements dans l'organisation moléculaire de l'eau et certaines de ses propriétés physico-chimiques, susceptibles d'influencer les processus biologiques. Toutefois, les effets de l'eau magnétisée restent controversés et nécessitent une validation expérimentale rigoureuse.

1. Notions de magnétisme:

Le magnétisme est un domaine de la physique qui étudie les propriétés magnétiques de la matière, propriétés dues aux moments magnétiques des particules qui la constituent. Les effets magnétiques jouent un rôle crucial dans les propriétés physiques observées, notamment dans la matière condensée, où les interactions entre les atomes du réseau cristallin déterminent les caractéristiques fondamentales des matériaux.

La matière étant constituée d'atomes, il est important de rappeler que les interactions entre les électrons donnent naissance à la structure des bandes d'énergie, tandis que les interactions entre les ions déterminent les propriétés vibrationnelles du réseau cristallin. Bien que ces phénomènes soient essentiels, l'intérêt de ce travail porte principalement sur les propriétés magnétiques, avec une brève évocation de ces interactions pour une meilleure compréhension globale.

Un atome est constitué d'un noyau autour duquel les électrons sont en mouvement. Le mouvement orbital des électrons autour du noyau engendre un moment magnétique appelé moment orbital $L\mu$, conformément à la loi d'Ampère. En parallèle, l'électron possède un mouvement de rotation sur lui-même, appelé spin, qui génère un moment magnétique supplémentaire, dit moment de spin $S\mu$. Le moment magnétique atomique résulte de la somme vectorielle de ces deux contributions.

Les moments magnétiques des atomes isolés et des ions libres sont déterminés par les règles de Hund. Les moments magnétiques de tous les électrons s'additionnent vectoriellement et, lorsque cette somme est non nulle, l'atome possède un moment magnétique dipolaire, qui constitue l'origine microscopique du magnétisme.

Il existe principalement deux grandes familles d'atomes magnétiques : la première correspond aux éléments de transition caractérisés par un remplissage incomplet de la sous-couche 3d, notamment ceux de la série du fer ; la seconde regroupe les terres rares et les actinides associés aux sous-couches 4f et 5f. Ces éléments présentent un moment magnétique à l'état isolé, bien que seuls certains conservent cette propriété lorsqu'ils appartiennent à un solide.

Dans les solides, la situation devient plus complexe en raison du grand nombre d'atomes et d'électrons ainsi que des interactions mutuelles entre eux. Pour décrire le comportement magnétique à l'échelle macroscopique, on introduit la grandeur appelée aimantation $\vec{M}$, définie comme le moment magnétique total par unité de volum.

Lorsqu'un champ magnétique externe $\vec{H}$ est appliqué à un matériau, celui-ci acquiert une aimantation. Cette réponse est caractérisée par la susceptibilité magnétique χ , définie par:

$$\chi = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{\partial \vec{M}}{\partial \vec{H}}$$

La susceptibilité magnétique dépend de la nature du matériau, de la température, de la structure cristalline et de l'état magnétique, et permet de classer les matériaux en différentes familles magnétiques.(26)

En électromagnétisme classique, le moment magnétique μ peut être interprété à l'aide du modèle de la boucle de courant. En supposant qu'un courant électrique I circule dans une boucle très petite de surface (dA), le moment magnétique élémentaire correspondant est donné par:

$$d\mu = IdA$$

La direction du vecteur surface est déterminée par la règle de la main droite.

En sommant les contributions de ces boucles élémentaires, on obtient le moment magnétique total μ d'une boucle de dimension finie. Les courants internes adjacents s'annulent mutuellement, et seul subsiste le courant circulant le long du contour de la boucle.

Dans la limite où la surface est petite mais où le moment magnétique reste fini, la boucle de courant peut être assimilée à un dipôle magnétique. Lorsqu'un tel dipôle est placé dans un champ magnétique externe $\vec{H}$, son énergie potentielle est donnée par:

$$E = -\mu \cdot H$$

Cette relation traduit la tendance du moment magnétique à s'orienter parallèlement au champ magnétique appliqué.(15)

2. Champs magnétiques:

Le champ magnétique est une région de l'espace qui entoure les matériaux aimantés ainsi que les conducteurs parcourus par un courant électrique. Il se manifeste par des forces qu'il exerce sur d'autres matériaux magnétiques et sur les charges électriques en mouvement.

En chaque point de l'espace, le champ magnétique est caractérisé par une direction et une intensité bien définies.

On peut également le décrire comme une zone dans laquelle une force magnétique est détectable autour d'un aimant ou d'un circuit électrique, traduisant l'influence de ce dernier sur son environnement.

Ce champ résulte du déplacement de charges électriques, notamment des électrons, que ce soit dans le vide ou à l'intérieur d'un conducteur, et il est associé à la présence de pôles magnétiques dans le cas des aimants.

3.Types des champs magnétiques:

❖ Le champ magnétique terrestre

Il s'agit d'une induction magnétique que l'on retrouve dans un grand espace autour de la terre. Aussi, on le retrouve dans le manteau et la croûte. Il vient du noyau externe de la terre, composé de 90 % de fer liquide et est causé par des mouvements de convection. Encore appelé bouclier terrestre par les scientifiques, ce type de champ magnétique se manifeste par un mécanisme de dynamo.

Les mouvements qui s'effectuent à l'intérieur de la terre sont produits par le refroidissement de la graine solide et du noyau. Ces derniers sont situés au centre de la terre. Sa présence dans la croûte terrestre est générée par les roches aimantées, on parle de lithosphère. Grâce au bouclier terrestre, plusieurs phénomènes se produisent dans l'espace et ont une signification.

Il y a par exemple l'ionosphère et la magnétosphère qui sont des phénomènes qui s'expliquent par la présence des ions électrons proches du soleil. Ils produisent des variations diurnes dans le sol et dans le champ magnétique. Il faut noter que le champ magnétique terrestre est vertical au niveau des pôles nord et sud de la terre.(12)

❖ Le champ magnétique uniforme

Il s'agit d'un champ magnétique où les forces en action suivent le même sens ou la même direction. Ainsi, les vecteurs de ce champ conservent la même direction et ses lignes sont parallèles. Elles suivent toujours une direction droite, du pôle nord vers le pôle sud. On dit qu'elles ont une direction fermée.

Le champ magnétique uniforme est généré par les aimants en U et les solénoïdes. Ainsi, pour générer un champ magnétique uniforme, il suffit de se mettre entre les deux parties droites ou l'entrefer d'un aimant en U, à l'intérieur de la partie interne du solénoïde ou encore au milieu d'une bobine d'Helmholtz. (12)

❖ Les champs électriques et magnétiques d'origine naturelle:

Principalement retrouvés sous la forme d'électricité statique. L'électricité statique augmente en fonction des conditions météorologiques, notamment lors d'orages. Il existe des variations du champ magnétique terrestre en fonction de l'endroit où l'on se trouve sur la planète. Globalement, il n'y a aucun lien décrit entre ce type de champs électromagnétiques et l'apparition de cancers.(15)

❖ Les champs électromagnétiques d'origine artificielle dits champs statiques:

On les retrouve lorsqu'on réalise des examens médicaux, notamment par imagerie par résonance magnétique (IRM). Il n'existe aucun lien décrit entre le risque d'apparition de cancers et ce type d'examen. (15)

❖ Les champs électromagnétiques d'extrême basse fréquence appelés ELF:

Ils correspondent à tous les appareils branchés sur une prise de courant électrique et sont donc des champs électriques (ELF) avec une intensité proportionnelle à la tension de la prise à laquelle l'appareil est branché. (15)

❖ Aimants permanents

Par exemple néodyme ayant deux pôles (N et S). Ils génèrent un champ magnétique permanent. Dans de tels aimants, les domaines magnétiques sont ordonnés, ce qui crée un champ magnétique puissant.(30)

❖ Courant alternatif

Le courant alternatif circulant dans des conducteurs ou des bobines génère un champ magnétique alternatif. Ils sont utilisés dans les transformateurs, les générateurs de courant alternatif et autres appareils électriques. (30)

❖ Électroaimants

Sont essentiellement une extension du point précédent (courant alternatif), car les électroaimants sont des dispositifs dans lesquels un champ magnétique est généré par une bobine à travers laquelle circule un courant électrique. En fonction du courant, la bobine peut générer un champ magnétique faible ou fort, qui peut ensuite être activé et désactivé – en fonction des besoins, ce qui est un phénomène utilisé dans un certain nombre d'appareils, par exemple les moteurs ou les conducteurs. (30)

❖ Courants micro-ondes et ondes radio

Ce sont des antennes alimentées par des courants à haute fréquence, qui génèrent également un champ magnétique. Cette propriété leur permet de transmettre et de recevoir des ondes électromagnétiques. (30)

❖ Champ magnétique d'un fil électrique

Il s'agit du champ magnétique que peut générer l'espace lorsque les charges d'un fil électrique sont en mouvement. Il est alors présent dans tout fil électrique où se répand le courant, qu'il devienne alternatif ou continu et génère un champ magnétique. Ce champ magnétique agit et varie en fonction de l'intensité du courant et de la consommation de l'électricité.

En outre, la distance qui sépare plusieurs fils électriques représente aussi l'une de ces fonctions. Cette propriété de variation du champ magnétique du courant électrique est mesurable. Cette quantification des variations est la fréquence. (15)

4.Principes physiques des champs magnétiques:

4.1. Principe de Curie

« Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. »

Dans une espace homogène et isotrope, si l'on fait subir une transformation géométrique à un système physique (ex : ensemble de particules, distribution de charges et/ou de courants) susceptible de créer certains effets (forces, champs), alors ces effets subissent les mêmes transformations. Si un système physique S possède un certain degré de symétrie, on pourra alors déduire les effets créés par ce système en un point à partir des effets en un autre point. (25)

4.2. Règles de symétrie

- Invariance par translation : si S est invariant dans toute translation parallèle à un axe Oz , les effets ne dépendent pas de z .
- Symétrie axiale : si S est invariant dans toute rotation θ autour d'un axe Oz , alors ses effets exprimés en coordonnées cylindriques (ρ, θ, z) ne dépendent pas de θ .
- Symétrie cylindrique : si S est invariant par translation le long de l'axe Oz et rotation autour de ce même axe, alors ses effets exprimés en coordonnées cylindriques (ρ, θ, z) ne dépendent que de la distance à l'axe ρ .
- Symétrie sphérique : si S est invariant dans toute rotation autour d'un point fixe O , alors ses effets exprimés en coordonnées sphériques (r, θ, ϕ) ne dépendent que de la distance au centre r .
- Plan de symétrie Π : si S admet un plan de symétrie Π , alors en tout point de ce plan,
 - un effet à caractère vectoriel est contenu dans le plan
 - un effet à caractère pseudo-vectoriel lui est perpendiculaire.
- Plan d'antisymétrie Π' : si, par symétrie par rapport à un plan Π' , S est transformé en $-S$, alors en tout point de ce plan,
 - un effet à caractère vectoriel est perpendiculaire au plan
 - un effet à caractère pseudo-vectoriel est contenu dans ce plan. (25)

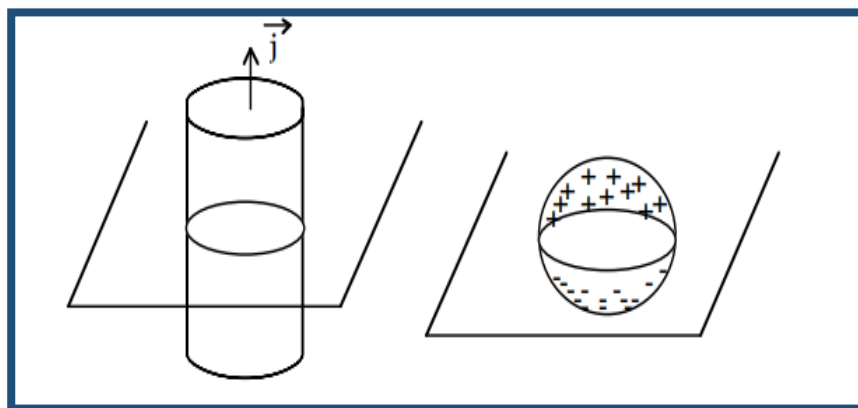


Figure02: Exemples de plans d'antisymétrie. (25)

Voici quelques règles simples et très utiles, directement issues de la liste ci-dessus :

- Si j est invariant par rotation autour d'un axe, B l'est aussi.

- Si j est poloidal (porté par u_ρ et/ou u_z), alors B est toroïdal (porté par u_θ).
- Si j est toroïdal, alors B est poloidal.
- Si le système de courants possède un plan de symétrie, alors j est contenu dans ce plan et donc B lui est perpendiculaire. (25)

5. La technologie de magnétisation de l'eau:

5.1. Définition:

La "technologie de magnétisation de l'eau" fait généralement référence à l'application de champs magnétiques aux systèmes d'eau à diverses fins, prétendant souvent améliorer la qualité de l'eau, favoriser la croissance des plantes ou procurer des bienfaits pour la santé. Cependant, il est important de noter que le consensus scientifique sur l'efficacité d'une telle technologie est mitigé, de nombreuses

revendications manquant de preuves empiriques solides(30;34;5).

Le principe de base derrière la technologie de magnétisation de l'eau est que l'exposition de l'eau à des champs magnétiques peut modifier ses propriétés physiques, telles que la réduction de la tension de surface ou le changement du comportement des minéraux dissous. Les partisans de cette technologie

affirment souvent que l'eau magnétisée peut améliorer l'absorption des nutriments par les plantes, améliorer la qualité du sol, réduire le tartre dans les tuyaux et équipements, voire procurer des bienfaits pour la santé en cas de consommation humaine.(5)

Cependant, bien qu'il y ait eu quelques études examinant les effets de l'eau magnétisée, les résultats sont mitigés et de nombreuses affirmations restent non vérifiées ou même réfutées par l'examen scientifique.

Les critiques soutiennent que les effets observés pourraient être dus à des effets placebo ou à d'autres facteurs confondants plutôt qu'à un traitement magnétique proprement dit (26;5).

5.2. Les principes de la technologie de magnetization:

Technologie de magnétisation de l'eau repose sur l'interaction entre les champs magnétiques et les molécules d'eau. Lorsque l'eau traverse un champ magnétique, sa structure moléculaire subit de subtils changements. Ces changements influencent le comportement des minéraux et des ions dissous, modifiant leurs propriétés physiques et chimiques. Par exemple, le carbonate de calcium, un minéral commun dans l'eau, devient moins enclin à former des dépôts calcaires sous traitement magnétique.

Des études scientifiques valident ces principes. Les chercheurs Fathi et al. (2006) ont observé une précipitation accrue de carbonate de calcium lorsque l'eau était exposée à des champs magnétiques, en particulier à des débits plus élevés et à des durées de traitement plus longues. Smith et al. (2003) ont rapporté des réductions de la formation de tartre allant de 17% à 70% dans les réservoirs d'eau chaude traités magnétiquement. Ces résultats mettent en

évidence le potentiel du traitement magnétique de l'eau pour améliorer la qualité et l'efficacité de l'eau. (24)

5.3. Deux types d'hydro-magnétiseurs:

Parmi les différents types d'hydro-magnétiseurs, nous nous concentrerons uniquement sur deux modèles largement répandus : le Delta-Water et l'anneau MERUS.

5.3.1. Technologie Japonaise "Delta-Water"

Les magnétiseurs Delta-Water (Figure 03) sont des appareils conçus pour être respectueux de l'environnement et de haute qualité de traitement des eaux. Ils ont été inventés pour faire face à la chimie dure de l'eau à haute salinité située dans les pays dépourvus d'eau douce. Ne nécessitant aucune source d'énergie, aucun entretien, le Delta-Water confère à l'eau ses qualités énergétiques (vitalité et mobilité). Le principe du procédé Delta-Water est basé sur l'application d'un champ magnétique à l'eau. Cette application permet de donner un mouvement et une énergie à l'eau qui stagne dans les conduites et /ou dans les citernes de réserve, sachant que la stagnation de l'eau provoque le dépôt des minéraux, l'oxydation et la multiplication des bactéries et des biofilms à l'intérieur des conduites.(25)



Figure 03: Magnétiseur Delta-Water (ANONYME 2).

5.3.2. Technologie Allemande anneau MERUS

L'anneau MERUS (Figure 04) est un dispositif unique, fiable, multifonctionnel dans le domaine de traitement de l'eau. Il traite l'eau par un principe biophysique basé sur les mouvements et les oscillations d'ondes moléculaires qui, en traversant tout type de conduite, sont absorbées par l'eau sous forme de signaux résonant et interférents. Il génère ainsi un mouvement d'ondes de différentes fréquences se propageant et modifiant immédiatement les propriétés physiques des matières contenues dans l'eau sans en modifier l'aspect chimique. L'anneau MERUS possède à la fois un effet préventif et curatif sur toutes les canalisations et tous les équipements en empêchant la formation du tartre, de rouille, de boue et la corrosion des réseaux.(32)



Figure 04: Anneau magnétiseur MERUS (ANONYME 8).

6.L'eau magnétisée:

6.1. Définition de l'eau magnétisée:

L'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, et ses molécules sont liées par des liaisons hydrogène responsables de ses propriétés physiques et chimiques. Plusieurs études indiquent que le traitement physique de l'eau par des champs magnétiques ou des micro-ondes peut influencer la structure de ces liaisons et le comportement des molécules. Toutefois, les résultats restent divergents : certaines recherches montrent un affaiblissement des liaisons hydrogène avec l'augmentation de l'intensité du champ, tandis que d'autres suggèrent un renforcement ou une plus grande stabilité structurale. Ces différences sont attribuées aux variations des conditions de traitement, telles que l'intensité du champ, la durée d'exposition, la température, la vitesse d'écoulement et la composition en sels dissous, ainsi qu'aux caractéristiques des dispositifs utilisés.(55)

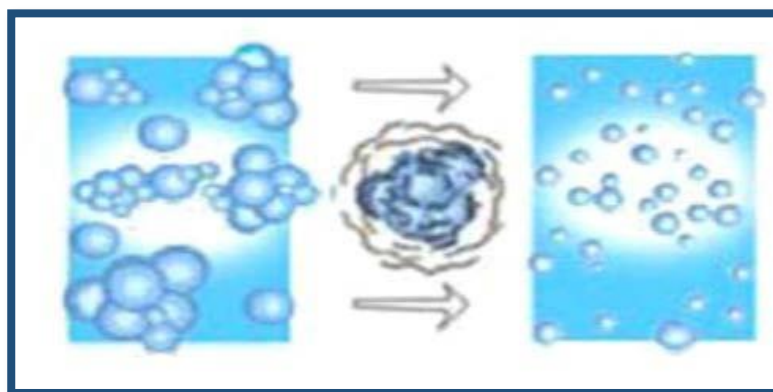


Figure 05: La structure de l'eau dynamisée en micromolécules(55)

Le traitement magnétique de l'eau consiste à la faire circuler à travers un champ magnétique qui affecte le mouvement des molécules d'eau et des ions dissous, modifiant

ainsi ses propriétés sans recours à des agents chimiques. Ce traitement serait susceptible de réorganiser les molécules d'eau en agrégats plus petits et plus homogènes, facilitant leur passage à travers les membranes cellulaires et limitant la pénétration des polluants. Les applications de cette technique, notamment en agriculture, ont montré des effets positifs tels que l'amélioration de la germination des semences, l'augmentation des rendements et la réduction des dépôts de calcaire, ainsi qu'une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau et des matériaux de nettoyage, faisant de l'eau traitée magnétiquement une solution respectueuse de l'environnement et d'intérêt pratique.(4)

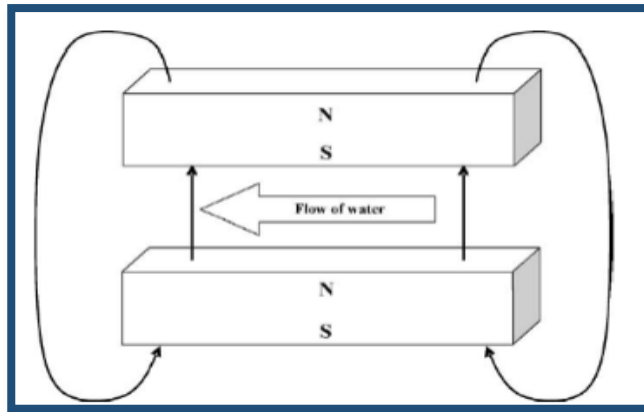


Figure 06: Schéma du champ magnétique et de la direction de l'écoulement de l'eau au cours du traitement(4)

6.2. Les propriétés de l'eau magnétisée:

6.2.1. Les propriétés physiques

- Elle augmente considérablement sa fréquence vibratoire qui passe de 1011 à 1015 hertz, la fréquence de la lumière visible.
- La cristallisation de l'eau magnétisée montre qu'elle présente de beaux cristaux (Figure 7)



Figure 07: Cristaux de Masaru Emoto (un Médecin chercheur Japonais)(1)

La surface de tension d'une eau magnétisée est abaissée ce qui lui confère des propriétés plus mouillantes.(1)

6.2.2. Les propriétés chimiques

- Elle favorise l'ionisation des molécules d'eau.
- Plus des ions hydroxyle (OH⁻) sont créés pour former des molécules alcalines, et réduire l'acidité.
- Elle détruit les masses d'eau inertes pour créer une majorité d'isomères trimères
- Elle transforme une eau oxydée en eau réduite et produit des électrons libres. (1)

6.3. Comment les champs magnétiques modifient les propriétés de l'eau?

Les champs magnétiques influencent les propriétés de l'eau en modifiant sa dynamique moléculaire. Ce processus affecte des paramètres tels que la température, la conductivité électrique (EC), le total des solides dissous (TDS) et le pH. Lorsque l'eau traverse un champ magnétique, ces propriétés se modifient, créant des variations mesurables qui améliorent son utilisation pour l'irrigation.

La recherche démontre clairement ces effets. Les études montrent que l'eau traitée par magnétisme présente des changements dans les niveaux de CE et de TDS, ce qui peut améliorer l'absorption des nutriments par les plantes. En outre, les variations des niveaux de pH contribuent à une meilleure compatibilité avec le sol. Ces ajustements font de l'eau magnétisée une ressource précieuse pour l'agriculture, offrant des avantages pratiques pour la croissance des plantes et la santé des sols.

Principales conclusions des articles de recherche :

[Les champs magnétiques permanents modifient les paramètres de l'eau, notamment l'EC, le TDS et le pH.](#)

Des variations mesurables se produisent dans différentes conditions d'écoulement, ce qui prouve l'impact du traitement magnétique.

Les variations de l'écart-type dans l'eau d'afflux exposée aux champs magnétiques mettent en évidence la cohérence de ces effets.(24)

6.4. Les effets de l'eau magnétisée:

L'eau magnétisée présente un intérêt scientifique en raison de ses effets potentiels sur les propriétés physico-chimiques de l'eau. L'exposition à un champ magnétique peut modifier sa structure, sa tension superficielle et sa conductivité, influençant ainsi plusieurs applications agricoles, industrielles et environnementales.(1; 8)

6.4.1. Les effets sur l'organisme humain:

Selon (MARWENI, 2015) et (Santé et Médecine Traditionnelle, 2017), l'eau magnétisée, également appelée eau biodynamisée, structurée ou vitalisée, possède plusieurs effets potentiels sur l'organisme. Elle permettrait une hydratation quatre fois supérieure à celle de l'eau normale et six fois plus rapide.

Par ailleurs, elle contribuerait à une hydratation rapide au niveau cellulaire, favorisant ainsi une revitalisation globale du corps, ainsi qu'à une oxygénation accrue des cellules. Elle serait également associée à une diminution des radicaux libres, à un pH légèrement alcalin et

à une activation des enzymes, tout en soutenant le système immunitaire. De plus, elle participerait à un meilleur équilibre métabolique, à une meilleure absorption des nutriments et à une amélioration de la communication extracellulaire, ainsi qu'à une élimination plus efficace des déchets intracellulaires.(1)

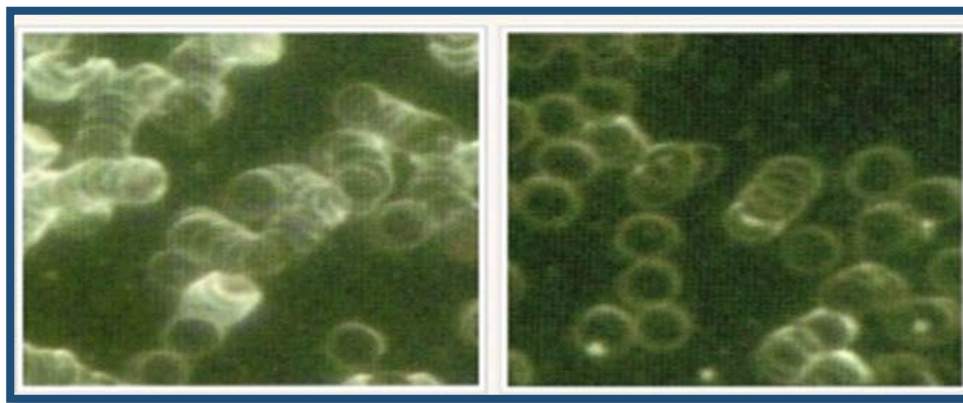


Figure 08: Effet de la consommation de l'eau vitalisée sur le sang(1)

6.4.2. Les effets sur les plantes

L'eau constitue la source principale de vie pour les plantes, représentant plus de 70% de leur masse et jouant un rôle essentiel dans l'hydratation et la circulation de la sève. L'utilisation d'eau magnétisée ou dynamisée favorise plusieurs processus physiologiques et agronomiques. Elle augmente le pouvoir mouillant dans les tissus végétaux et améliore le taux de germination des graines, ce qui peut être attribué à une meilleure absorption de l'eau suite au traitement magnétique. De plus, un élargissement et un développement plus importants des vaisseaux du xylème et de la stèle des plantules irriguées par l'eau magnétisée ont été observés par rapport aux plantules traitées avec de l'eau non dynamisée, phénomène lié à l'augmentation de l'activité de l'enzyme peroxydase entraînant la lignification des cellules et le passage rapide vers la structure secondaire. L'eau magnétisée contribue également à l'augmentation du développement foliaire et racinaire ainsi que de la biomasse totale, tout en réduisant le recours aux produits chimiques et aux fertilisants.(8)

L'application d'un champ magnétique sur les graines a montré une accélération de la germination et une augmentation du pourcentage de graines germées. Carbonell et al. (2000) ont constaté une amélioration du taux de germination des grains de riz traités, tandis que Lune et Chung (2000) ont observé que les graines de tomates germinaient 1,1 à 2,8 fois plus rapidement que les graines témoins. Pour les grandes graines d'haricots, la germination s'effectuait 2 à 3 jours plus tôt après traitement magnétique. (8)

En termes de rendement des cultures, Hilal (2000) et Reina et al. (2002) ont rapporté une augmentation significative de l'absorption d'eau et de la masse totale de la laitue irriguée avec de l'eau magnétisée. Les plantes de pois chiches ont montré une croissance supérieure en taille et en poids par rapport aux plantes irriguées avec de l'eau du robinet. Ces effets sont attribués à l'augmentation des pigments photosynthétiques, à l'activation du métabolisme cellulaire et à la mitose des méristèmes. De plus, la formation de nouvelles protéines induite par l'eau magnétisée contribue à stimuler la croissance des plantes. L'eau magnétisée est ainsi

liée à une augmentation des pigments photosynthétiques, des promoteurs endogènes, des phénols totaux et à la biosynthèse des protéines.

Enfin, dans le cas des eaux riches en calcaire, la magnétisation permet de réduire les dépôts de CaCO_3 sur la végétation et d'améliorer la photosynthèse chlorophyllienne, tout en prévenant l'encrassement des installations d'irrigation. (8)

6.4.3. Action sur les animaux:

L'eau magnétisée est bénéfique aussi à la santé et au bien-être des animaux. Comme eau de boisson, nous retrouvons les mêmes avantages qu'elle apporte à l'organisme humain. Le traitement magnétique des eaux réduit la consommation quotidienne d'eau par les oiseaux d'environ 5,46%

En conclusion, l'eau magnétisée constitue un domaine de recherche émergent qui suscite un intérêt croissant en raison de ses effets potentiels sur les propriétés physico-chimiques de l'eau. Les différents concepts présentés dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence les mécanismes supposés de la magnétisation ainsi que ses impacts possibles sur les systèmes biologiques et agricoles. Bien que plusieurs études aient rapporté des résultats encourageants, notamment en termes d'amélioration des caractéristiques de l'eau et de ses applications, certaines interprétations restent encore sujettes à débat. Ainsi, des recherches complémentaires s'avèrent nécessaires afin de mieux comprendre les phénomènes impliqués et de confirmer scientifiquement l'efficacité de cette technologie.(1)

Chapitre 03 :

Plasma et plasma froid

Le plasma est le quatrième état de la matière, constitué d'un gaz ionisé riche en particules énergétiques et espèces réactives. Le plasma froid, caractérisé par une faible température et une forte réactivité chimique, produit des espèces actives (ROS, RNS) capables d'interagir avec les milieux biologiques. Grâce à ces propriétés, il représente une technologie prometteuse pour le traitement de l'eau et diverses applications environnementales et biomédicales.

1. Historique du Plasma

Le mot plasma vient du grec qui signifie «substance gelée». Le plasma a été découvert pour la première fois et décrit par le physicien chimiste britannique **Sir William Crookes**, dans un tube appelé le tube de Crookes, c'est le premier tube expérimental d'une décharge électrique, à vide partiel, inventé par ce physicien britannique. Les électrons dans ce tube (les rayons cathodiques) voyagent en ligne droite à partir de la cathode (qui se trouve à gauche), comme la montre l'ombre projetée par la croix de Malte en métal sur la fluorescence de la paroi droite en verre du tube (Figure.1). La nature de cette matière de "rayons cathodiques" a été par la suite identifiée par le physicien britannique Sir Joseph John Thomson dans sa conférence du soir à la Royal Institution le vendredi 30 avril 1897 (qui a élaboré sa découverte que les atomes étaient constitués des particules plus petits, s'appelle corpuscules, connu par la suite par le nom d'électrons).⁽³¹⁾

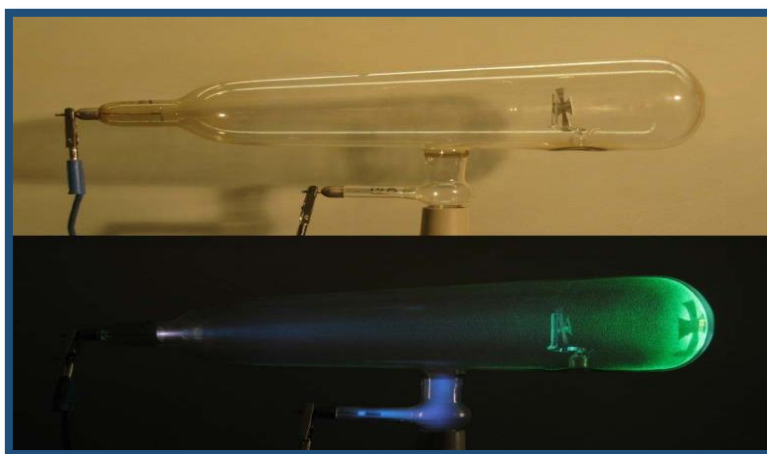


Figure09: Le tube de Crookes en 1869⁽³¹⁾

2. Généralités sur les plasmas

2.1. Définition

Un plasma est un milieu composé d'électrons et d'ions, libres de se mouvoir dans toutes les directions de l'espace ; ce milieu gazeux se distingue d'un gaz classique, composé exclusivement de particules électriquement neutres, par la nature de l'interaction qui existe entre particules chargées. Dans un gaz classique, l'interaction entre particules électriquement neutres est à courte portée et, lorsque la pression du gaz n'est pas très supérieure à la pression atmosphérique, elle ne met généralement en cause que deux particules à la fois (interaction binaire). Dans ce cas, pour deux particules se dirigeant l'une vers l'autre et séparée d'une distance r , l'interaction est d'abord attractive (force en $1/r^7$ dite de VAN DER WAALS) puis,

immédiatement avant le “contact” et de façon abrupte, elle devient répulsive (parfois modélisée par une dépendance de la force en $1/r^{13}$, [5, 1.7.9]). Au contraire, l’interaction entre particules chargées (attractive ou répulsive suivant les charges en jeu) est à longue portée, puisque la force coulombienne entre particules est en $1/r^2$ et, de ce fait, chaque particule chargée peut interagir simultanément avec un très grand nombre d’autres particules chargées. (20)

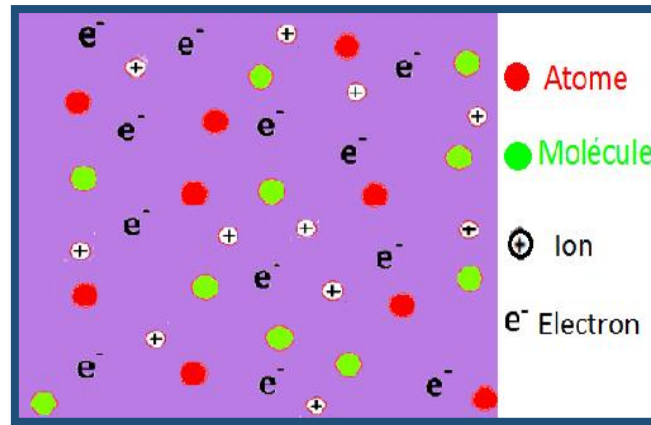


Figure10: Les constitutions d’un plasma⁽³¹⁾

2.2. Formes de plasma:

2.2.1 Plasmas naturels

S’appellent aussi plasmas spatiaux mis à part ces plasmas créés en laboratoires (plasmas artificiels), il existe des plasmas naturels. Dans le voisinage de la terre, on peut mentionner les éclairs, les aurores boréales ou l’ionosphère. Dans l’espace, les environnements ou les intérieurs stellaires constituent d’autres exemples de plasmas présents dans l’univers [30]. Le soleil, par exemple, génère un plasma très conducteur, le vent solaire, qui progresse à quelques centaines de km/s dans l’espace interplanétaire. Ou le vent solaire rencontre le champ magnétique terrestre, il subit une déviation et génère une onde de choc. Face au soleil, le champ se trouve comprimé, alors qu’il est étiré sous forme d’une longue queue magnétique du côté opposé. (31)



Figure11: Foudres Aurores Polaires Anatomie d’une comète⁽³¹⁾

2.2.2. Les plasmas artificiels

C'est des plasmas créés par l'homme en laboratoire sont généralement faiblement ionisés. Étant donné leur faible densité, leurs propriétés physiques (grande compressibilité, énergie interne et pression proportionnelle à la température absolue, écoulements, ondes acoustiques, etc.) sont analogues à celles des gaz neutres, tandis que leurs propriétés électromagnétiques (conductivité électrique, indice de réfraction, etc.) sont différentes dues à la présence d'électrons libres.⁽³¹⁾

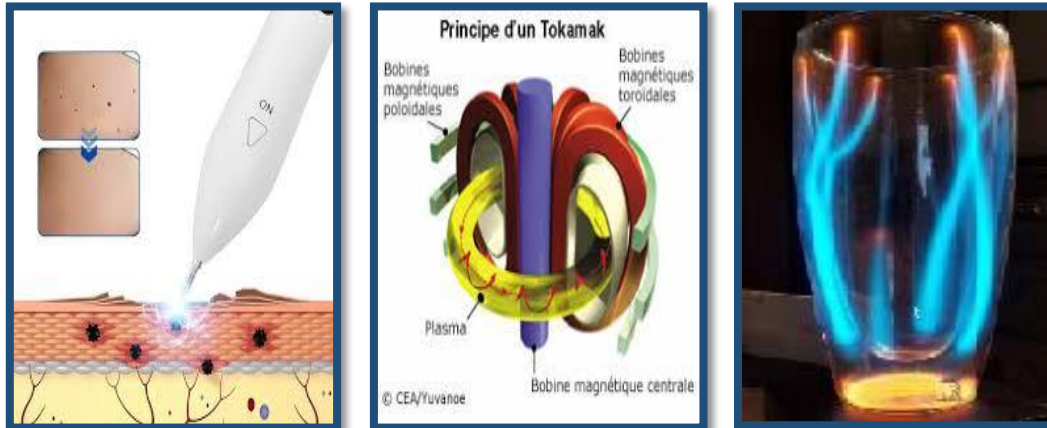


Figure12:Macro fin du stylo laser Principe de fonctionnement Lampe à plasma Néon en de plasma d'un Tokamak verre

2.3. Les différents types des plasmas

2.3.1. Les plasmas chauds

Le plasma chaud, notamment celui utilisé dans la fusion thermonucléaire, est un milieu totalement ionisé constitué uniquement d'ions et d'électrons. Il se caractérise par des températures extrêmement élevées pouvant atteindre plusieurs dizaines de millions de degrés. Le plasma se distingue également par le comportement collectif de ses particules chargées électriquement, résultant des interactions électromagnétiques qui dominent sa dynamique.⁽³⁸⁾

2.3.2. Les plasmas froids

On obtient un plasma froid, par exemple, en créant une décharge électrique dans un gaz à basse pression.

Ce plasma est un gaz froid (légèrement plus chaud que la température ambiante, jusqu'à quelques centaines de degrés) rempli d'électrons chauds (de 1 000 à 100 000 kelvins).

Il est très faiblement ionisé (de 10^{-7} à 10^{-2} ions par molécule neutre) et se compose donc principalement d'atomes et de molécules neutres.⁽³⁸⁾

3. Obtention du plasma

3.1. Augmentation de la température

La transformation d'un état gazeux en un état de plasma (qui s'appelle gaz ionisé) ne s'effectue pas à une pression donnée et une température constante, avec une chaleur latente (la chaleur latente c'est une quantité de chaleur qu'il faut fournir à une matière pour quelle

puisse changer de son état physique), comme pour les autres états de la matière; mais il s'agit d'une transformation progressive. Lorsqu'un gaz est suffisamment chauffé à certain degré Celsius, son énergie d'ionisation est de quelques électron-volts. La température nécessaire pour transformer le gaz à un plasma est donc celle à partir de laquelle l'énergie thermique, qui peut être estimée par le produit $k_B T$ (k_B : c'est la constante de Boltzmann, T : température) atteint cet ordre de grandeur, c'est-à-dire lorsque $k_B T \approx 1$ eV, soit une température égale à 11 000 K). Les électrons des couches extérieures de l'atome peuvent être arrachés (ou quittés l'atome) lors des collisions entre électron-particules, les noyaux et les électrons se déplacent indépendamment dans le milieu et forment un mélange globalement neutre « plasma ».⁽³¹⁾

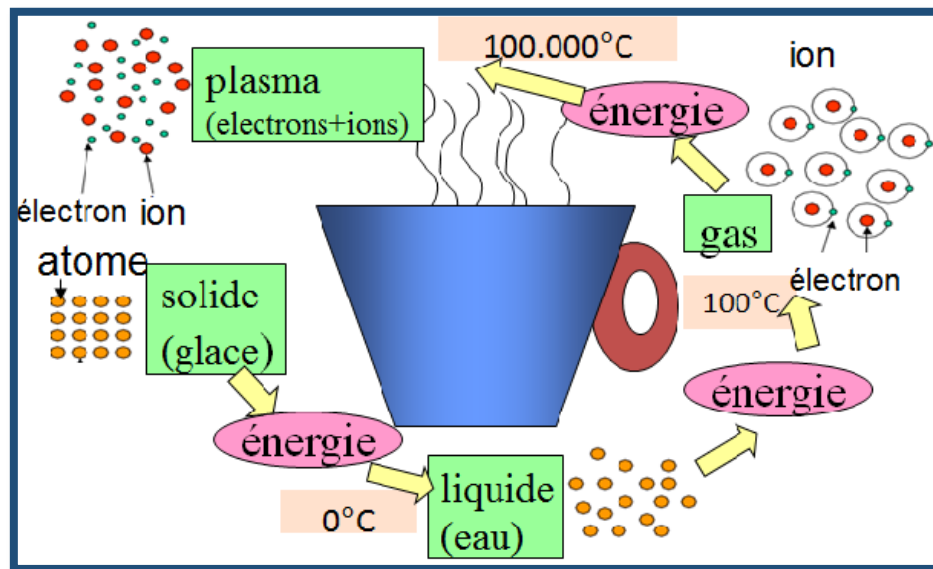


Figure13:Échelle de température pour les quatre matières.⁽³¹⁾

3.2. Décharge électrique

La décharge électrique c'est un système fermé composé de trois éléments essentiels :

- L'enceinte qui englobe tout le système
- Le volume gazeux dans lequel se produit la décharge électrique,
- Les électrodes entre lesquelles on applique un champ électrique, ce qui permet le passage d'un courant électrique dans le gaz.⁽³¹⁾

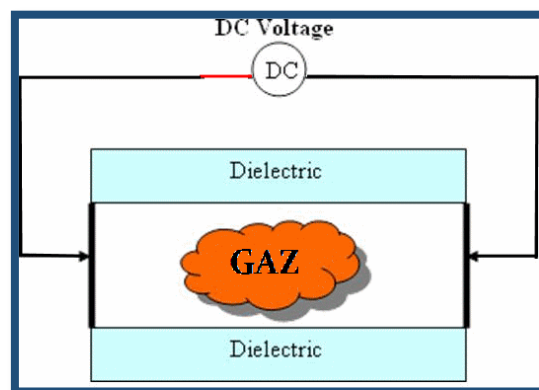


Figure14: Décharge Electrique⁽³¹⁾

Lorsqu'on applique une différence de potentiel dans une décharge électrique, le courant traverse le gaz qui se trouve au milieu, il dépose une partie de son énergie en excitant, et ionisant les molécules et les atomes de ce gaz cela nous permet de passer de l'état gazeux à l'état plasma. ⁽³¹⁾

4.Applications du plasma

Les plasmas sont utilisés depuis plusieurs décennies dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques. On les retrouve dans des phénomènes naturels tels que la foudre, les aurores boréales ou encore les étoiles, ainsi que dans des applications quotidiennes comme les tubes au néon et les étincelles électriques. Le plasma, considéré comme le quatrième état de la matière, est un gaz ionisé composé de particules chargées positivement et négativement. Sa luminescence caractéristique résulte de la recombinaison de ces charges, produisant une émission lumineuse dépendant de la nature chimique du gaz ⁽³¹⁾.

Grâce à ses propriétés particulières, notamment sa conductivité électrique et sa sensibilité aux champs électromagnétiques, le plasma trouve des applications variées dans plusieurs domaines tels que le biomédical, la stérilisation des instruments, la purification de l'eau, le traitement des déchets, le soudage, ainsi que dans les technologies de dépôt et de gravure utilisées en microélectronique. Il joue également un rôle essentiel dans la recherche sur l'énergie de fusion. Par ailleurs, les méthodes expérimentales, numériques et théoriques utilisées en physique des plasmas sont communes à d'autres disciplines comme la chimie, l'électronique et l'informatique. De plus, des techniques telles que l'implantation ionique permettent de modifier les propriétés des matériaux exposés au plasma, notamment dans les domaines de l'optique, de la biologie et de la métallurgie ⁽³¹⁾.

En complément, le plasma est largement exploité dans le traitement de surface des matériaux, notamment dans l'industrie textile. Comme alternative aux procédés chimiques classiques, des groupes fonctionnels hydrophobes et oléophobes peuvent être déposés à partir de la phase gazeuse grâce à deux techniques principales : la polymérisation plasma et le sputtering. Dans le cas de la polymérisation plasma, un monomère est introduit dans le plasma, où il est activé puis polymérisé avant d'être déposé sur la surface textile. Ce procédé peut être réalisé soit à basse pression sous vide avec une source d'énergie telle que les micro-ondes, soit à pression atmosphérique par décharge corona. En revanche, dans le sputtering, les groupes hydrophobes proviennent d'un substrat solide (tel que le PTFE) dont des fragments sont arrachés par le plasma puis déposés sur la surface textile. ⁽³⁷⁾

Pour obtenir des propriétés hydrophobes ou oléophobes, les monomères utilisés doivent posséder des structures chimiques adaptées ainsi qu'une pression de vapeur suffisante pour être introduits dans le réacteur plasma. Des composés silanés contenant des groupes alkyles, tels que l'hexaméthylidisiloxane (HMDSO) et le vinyltriméthylsilane (VTMS), sont couramment utilisés. Les polymères obtenus présentent des structures similaires à celles des composés silicones hydrophobe. ⁽³⁷⁾

5. Les paramètres physiques des plasmas

5.1. Densité du plasma

La densité du plasma, notée n , représente le nombre total de particules ionisées par unité de volume (exprimée en m^{-3}). Elle correspond à la somme de la densité des électrons (ne) et de celles des ions (ni) de chaque espèce, pondérées par leur valence zi , telle que :

$$n = ne + \sum i zi ni.$$

Dans un plasma, ces densités sont liées par le critère de neutralité macroscopique, ce qui signifie que la somme des charges positives et négatives est équilibrée :

$$ne - \sum i zi ni = 0.$$

La densité du plasma fait également référence à la concentration des particules ionisées dans un volume donné, et peut parfois être utilisée pour exprimer le pourcentage de gaz ionisé. Les champs électriques qui génèrent les plasmas transmettent leur énergie aux électrons, qui s'échauffent puis transfèrent cette énergie aux ions et aux particules lourdes (atomes, molécules) par collisions. Étant donné que la densité du plasma peut varier, ses propriétés physiques varient en conséquence ; même un plasma faiblement ionisé et de faible densité présente les caractéristiques d'un plasma. ⁽³¹⁾

Dans les applications industrielles, le plasma est généralement de type froid, caractérisé par des températures relativement basses et une faible densité électronique (souvent inférieure à 1 %, soit environ 10^8 électrons/cm³). En revanche, le plasma chaud, associé aux phénomènes astrophysiques ou à la fusion thermonucléaire, est fortement ionisé et possède une densité très élevée pouvant atteindre environ 10^{12} électrons/cm³. ⁽³¹⁾

À basse pression, la densité du plasma ainsi que le taux de collisions sont faibles, ce qui peut entraîner un déséquilibre thermique entre les électrons et les particules lourdes. Dans certains cas, comme les plasmas de fusion, les températures électronique et ionique peuvent être égales ($T_i = T_e$). En revanche, dans les plasmas à basse pression, comme ceux des lampes, la température électronique est généralement beaucoup plus élevée que celle des ions ($T_e \gg T_i$). ⁽³¹⁾

De manière générale, les plasmas sont caractérisés par leur densité et leur température. Le produit nT (densité-température) constitue un paramètre important, dépendant de la puissance injectée et des conditions de confinement du plasma. ⁽³¹⁾

5.2. La température

La physique des plasmas, attribue à chaque particule une température propre : T_e pour les électrons, T_i pour les ions, et T_n pour les particules neutres. La température du plasma elle-même est définie comme l'énergie cinétique moyenne des particules et est exprimée en

unité d'énergie (eV), avec $1 \text{ eV} = 1,116 \cdot 10^4 \text{ K}$. La température T_α de la particule d'espèce α ($\alpha = i, e, n$) de masse m_α est reliée à sa vitesse thermique moyenne v_α par:

$$\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \frac{3}{2} k_B T_\alpha$$

où $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, étant la constante de Boltzmann. En fonction de leurs températures, les plasmas sont repertoriés en trois classes. Les plasmas chauds ont une température élevée qui est uniforme pour toutes les espèces ($T_i = T_e$). Ils se trouvent en état d'équilibre thermodynamique total et peuvent être observés dans le cœur des étoiles, ou produits artificiellement dans des réacteurs de fusion nucléaire. Dans les plasmas hors équilibre, tel que les plasmas froids, les températures électronique T_e , sont largement supérieures aux températures ioniques T_i . Dans une décharge lumineuse, on observe typiquement des valeurs de température électronique allant de $10^4 \text{ K} < T_e < 10^5 \text{ K}$, tandis que $3 \cdot 10^2 < T_i < 10^3 \text{ K}$.⁽⁵⁷⁾

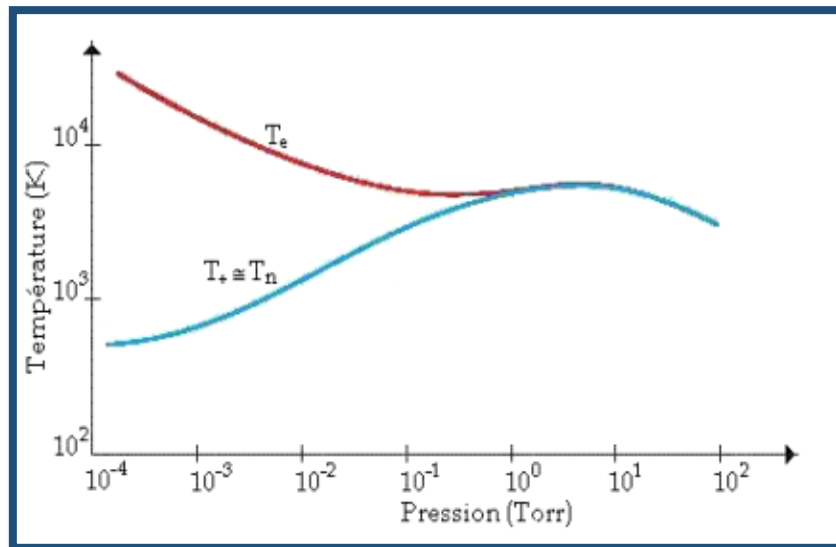


Figure15: Distribution des températures électronique T_e , ionique T_i et du gaz T_n en fonction de la pression.⁽³⁸⁾

5.3. La pression

La pression est définie comme la force exercée par les particules sur une unité de surface des parois du récipient contenant le plasma. Elle est généralement exprimée en pascals (Pa) ou en Torr, avec la correspondance suivante : $1 \text{ Torr} = 133,32 \text{ Pa}$.

Selon la valeur de cette pression, les plasmas peuvent être classés en plusieurs types distincts:

5.3.1. Plasma à basse pression :

Il est généralement maintenu à des pressions comprises entre 10^{-3} et 10^3 Pa et est couramment utilisé dans diverses applications industrielles telles que le traitement de surface par plasma en microélectronique.⁽³⁸⁾

5.3.2. Plasma à pression atmosphérique :

Il est généralement maintenu à des pressions proches de la pression atmosphérique, qui est d'environ 10⁵ Pa. Ces plasmas ont suscité une attention considérable ces dernières années en raison de leurs potentiels d'applications dans des domaines de la biomédecine et de la dépollution. ⁽³⁸⁾

5.3.3. Plasma à haute pression :

Il est maintenu à des pressions supérieures à 10⁵ Pa. Les particules sont fortement comprimées, ce qui entraîne des collisions fréquentes. Ces collisions provoquent des transferts d'énergie entre les particules, maintenant ainsi le plasma dans un état d'excitation élevée. Cette excitation se traduit souvent par l'émission de lumière. ⁽³⁸⁾

5.4. Degré d'ionisation

Un plasma se distingue par son degré d'ionisation α qui définit la fraction d'atomes ionisés dans le milieu ; il est calculé via l'équation :

$$\alpha = \frac{n_e}{N + n_e}$$

où n_e représente le nombre d'électrons, et N est la densité des atomes ou molécules neutres.

- ✓ Si $\alpha \leq 10^{-4}$, le plasma est dit "faiblement" ionisé, et se compose de quelques ions et électrons en mouvement dans un océan d'atomes ou de molécules neutres. Dans ce régime, les propriétés du plasma sont déterminées par les collisions entre les électrons et les particules neutres (atomes ou molécules).
- ✓ Si $\alpha > 10^{-4}$, le plasma est considéré comme "fortement" ionisé, et les interactions coulombiennes deviennent le moteur principal de la dynamique du plasma. Dans ce régime, les électrons et les ions interagissent avec des forces électrostatiques intenses.
- ✓ Si $\alpha = 1$, le plasma est dit « totalement » ionisé, la densité des atomes ou molécules neutres est donc nulle. ⁽³⁸⁾

5.5. Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen (λ) est la distance qu'une particule (comme électron, ion, atome, etc.) du plasma traverse entre deux collisions (deux chocs successifs) et, due à la nature statistique des collisions, il a une distribution spécifique. Il peut généralement être décrit par l'équation suivante:

$$\lambda = \frac{\overline{v_{e,l}}}{v_{e,i}} = \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} = \frac{1}{N\sigma}$$

Où $\overline{v_{e,l}}$ est la vitesse moyenne de l'électron ou ion, $v_{e,i}$ est le taux de collision d'électrons ou d'ions.

r_1, r_2 sont les rayons des particules en collisions ou (diamètre de la particule bombardé)

N est la densité du nombre de la particule (nombre de particules par unité de volume).

σ : Section efficace de collision $= \pi(r_1 + r_2)^2$

C'est pourquoi les plasmas se font généralement à basse pression, en abaissant la pression, on diminue la densité N , on a donc un libre parcours moyen plus grand. Cela permet aux particules d'avoir plus de temps pour être accéléré par le champ électrique entre les collisions

et ainsi fournir un plus grand transfert d'énergie lors de la collision ce qui facilite l'ionisation et ainsi l'obtention d'un état plasma stable.⁽³¹⁾

5.6. Le potentiel flottant

C'est une mesure de la différence de potentiel électrique entre le plasma et la surface avec laquelle il interagit. Il est défini comme la différence de potentiel électrique entre les deux points dans un champ électrique généré par le plasma et la surface. On souligne que la surface peut être les parois du volume délimitant le plasma, une sonde, des grains de poussières ou surfaces destinées à des traitements.⁽³⁸⁾

5.7. Longueur de Debye

La longueur de Debye est une caractéristique spatiale du plasma qui représente la distance sur laquelle les charges électriques sont écrantées (neutralisées). Elle traduit l'effet d'écran électrostatique autour des particules chargées.⁽³⁸⁾

Pour une espèce (s), elle est définie par :

$$\lambda_{Ds}^2 = \frac{\epsilon_D k_B T_s}{n_s e^2}$$

où (ϵ_0) est la permittivité du vide et (k_B) la constante de Boltzmann.

La longueur de Debye électronique s'écrit :

$$\lambda_{De}(m) = 6.9 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{T_e(K)}{n_e(cm^{-3})}} = 7.43 \times 10^3 \sqrt{\frac{T_e(eV)}{n_e(m^{-3})}}$$

Pour un plasma contenant électrons et ions, la longueur de Debye généralisée est donnée par :

$$\frac{1}{\lambda_D^2} = \frac{1}{\lambda_{Di}^2} + \frac{1}{\lambda_{De}^2}$$

5.8. Fréquence plasma

C'est une caractéristique temporelle fondamentale du plasma, qui décrit la réponse collective des charges électriques à une perturbation (champ électrique externe par exemple). Cette réponse se manifeste par des oscillations de particules (des électrons : e et des ions : i) autour d'une position d'équilibre, avec une fréquence donnée par les équations

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad , \quad \omega_{pi} = \sqrt{\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 m_i}}$$

Bien que ces équations soient souvent utilisées dans la littérature pour désigner la fréquence électronique et ionique du plasma, cela est quelque peu abusif. En effet, ces grandeurs correspondent en réalité à des pulsations, et leurs fréquences correspondantes sont données par l'équation $f_{ps} = \omega_{ps}/2\pi$, où s = e pour les électrons et s = i pour les ions.⁽³⁸⁾

5.9. Le paramètre de couplage électrostatique

Le paramètre de couplage électrostatique, noté Γ , est une grandeur sans dimension qui quantifie l'impact de l'interaction électrostatique entre les particules chargées dans le plasma. C'est le rapport de l'énergie potentielle d'interaction entre deux particules chargées sur leur

énergie d'agitation thermique. Le paramètre Γ régit le comportement collectif du plasma et est utilisé pour décrire des phénomènes tels que les transitions de phase dans le plasma, etc.

Une valeur élevée du paramètre de couplage électrostatique indique un fort couplage entre les particules chargées, ce qui peut conduire à un comportement collectif et à des instabilités du plasma. Pour introduire le paramètre Γ , considérons le cas de deux particules identiques distants de la distance a ayant la même charge $Q_d = z_d e$. L'énergie d'interaction électrostatique entre cette paire de particules s'écrit : $U = (Q_d^2 / 4\pi\epsilon_0 a) e^{-a/\lambda_D}$.⁽³⁸⁾ Le paramètre de couplage électrostatique s'écrit donc comme :

$$T = \frac{U}{K_B} = \frac{Z_d^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a} e^{-a/\lambda_D} \frac{1}{K_B T}$$

6. L'eau traitée au plasma froid:

6.1. Définition:

L'eau activée par plasma (EAP) est une technologie innovante basée sur le plasma froid, produisant une eau riche en espèces réactives de l'oxygène (ERO) et de l'azote (ERN) telles que O_3 et H_2O_2 . Grâce à ces composés, l'EAP possède de fortes propriétés antimicrobiennes, permettant l'inactivation des bactéries, virus et champignons, ainsi que la désinfection de l'eau potable et le traitement des eaux usées.⁽²⁶⁾

Elle est également capable de dégrader efficacement les polluants organiques (médicaments, colorants, pesticides) et de perturber les biofilms. En agriculture, l'EAP améliore la germination des semences, stimule la croissance des plantes et prolonge la conservation des produits en réduisant la charge microbienne. Son efficacité dépend principalement de la concentration des espèces réactives.⁽³⁸⁾

6.2. Propriétés physico-chimiques de l'eau activée par plasma

L'eau activée par plasma (EAP) est une eau traitée par un plasma, généralement froid, qui modifie ses propriétés physico-chimiques. Ce traitement entraîne la formation d'espèces réactives (ROS et RNS), une variation du pH, de la conductivité et du potentiel d'oxydoréduction. Ces changements confèrent à cette eau des propriétés particulières exploitées dans divers domaines tels que la désinfection, l'agriculture et le traitement de l'eau.

6.2.1. Propriétés physiques

- ✓ **Densité:** La densité de l'eau pulvérisée (EAP) est directement proportionnelle à la concentration d'ions. Lors du traitement plasma, diverses espèces chargées libres et des ions diffusent dans l'eau, ce qui entraîne une augmentation de la concentration de ces ions et donc une augmentation de la densité.⁽¹⁷⁾
- ✓ **Tension superficielle:** La tension superficielle de la solution EAP diminue avec l'augmentation de la conductivité électrique. Cette diminution de la tension superficielle est attribuée à l'augmentation des ions NO_3^- dans la solution EAP, qui peuvent interférer

avec la liaison hydrogène de la molécule d'eau lorsque les ions NO_3^- sont attirés par la surface de contact air-liquide.⁽¹⁷⁾

- ✓ **Le pH:** de l'eau saturée en acide pantothénique (EAP) diminue avec l'augmentation de la durée du traitement. Cependant, lors d'un traitement prolongé, la vitesse de diminution du pH ralentit et atteint ensuite un état d'équilibre où il reste constant.

Malgré son acidité et son faible pH, la EAP est considérée comme sûre pour une application cutanée en tant que désinfectant. Elle n'est ni toxique ni corrosive. Des études ont démontré que, appliquée à des souris, la EAP peut favoriser la cicatrisation des plaies cutanées sans endommager les tissus.

De plus, une étude *in vivo* menée sur des souris porteuses de cellules cancéreuses du pancréas a montré que la EAP est non toxique et sans danger pour une utilisation chez les animaux. Lorsque le pH de la EAP est relativement neutre, la concentration d'espèces réactives telles que H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- et ONOO^- peut rester stable dans le temps. Cependant, à des pH inférieurs à 3,5, les espèces réactives deviennent instables et réagissent entre elles, entraînant une concentration instable de ces espèces. Néanmoins, une étude récente a démontré une méthode hybride de conservation et de restauration du EAP par stockage à basse température et ajustement du pH ; cette méthode permet de préserver efficacement l'effet bactéricide du EAP pendant une durée allant jusqu'à 10 jours.⁽¹⁷⁾

- ✓ **Conductivité électrique:** L'eau activée par plasma (EAP) étant composée de diverses espèces chargées et d'ions libres, en raison de la diffusion d'espèces réactives dans l'eau lors du traitement au plasma, sa conductivité augmente. Des études ont montré que la conductivité de la EAP peut atteindre 100 à 500 mS/cm. La conductivité électrique de la EAP est un indicateur important de la concentration globale des espèces réactives et des ions.⁽¹⁷⁾
- ✓ **Potentiel d'oxydoréduction:** L'EAP présente des potentiels d'oxydoréduction élevés. Par exemple, le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est une espèce importante qui contribue à ces potentiels d'oxydoréduction élevés, du fait de sa capacité à agir comme oxydant ou réducteur. De même, les espèces réactives de l'oxygène (ROS) telles que le radical hydroxyle ($\text{OH}^\bullet$) et l'ozone ($\text{O}_3^\bullet$), ainsi que les espèces réactives de l'azote (RNS) telles que les nitrates ($\text{NO}_3^\bullet$), les nitrites ($\text{NO}_2^\bullet$) et le peroxy-nitrite ($\text{ONOO}^\bullet$) contribuent également à ce potentiel d'oxydoréduction élevé.⁽¹⁷⁾

6.2.2. propriétés chimiques

6.2.2.1. Espèces réactives de l'oxygène (ROS)

- Le radical hydroxyle (OH) est le précurseur du peroxyde d'hydrogène présent dans l'eau de palme artificielle (EAP) et constitue un puissant oxydant. Sa durée de vie est courte, d'environ 200 μs en phase gazeuse, et de seulement quelques nanosecondes en phase liquide, en raison de sa forte réactivité. OH joue un rôle essentiel dans la formation de diverses espèces réactives, notamment en phase gazeuse (avant leur diffusion dans les liquides). La concentration des espèces réactives dans l'EAP, pour une application antimicrobienne, est étroitement liée à la concentration d' OH . Du fait de sa courte durée de vie, l' OH présent dans l'EAP provient généralement de réactions secondaires telles

que la décomposition du peroxyde d'hydrogène et la réaction de l'ozone avec le peroxyde d'hydrogène ou le radical hydroperoxy. ⁽¹⁷⁾

- Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est l'espèce à longue durée de vie la plus courante dans l'EAP et joue un rôle important dans les propriétés antimicrobiennes et la germination des semences. Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est principalement généré dans l'eau activée par deux voies : (1) les radicaux OH générés en phase gazeuse se combinent pour former du H_2O_2 puis diffusent directement dans la phase liquide et (2) les radicaux OH générés en phase gazeuse diffusent dans la phase liquide puis se combinent pour former du H_2O_2 . ⁽¹⁷⁾

Le H_2O_2 est capable de diffuser librement à travers la membrane cellulaire sans la perturber. Par conséquent, les peroxydes d'hydrogène qui interagissent avec lui sont capables d'endommager la membrane cellulaire et d'en augmenter la perméabilité, facilitant ainsi l'invasion de la cellule cible par les espèces réactives extracellulaires présentes dans l'eau activée par l'eau. ⁽¹⁷⁾

- L'ozone (O_3) en solution aqueuse est un puissant agent oxydant antimicrobien qui possède l'un des potentiels d'oxydoréduction les plus élevés parmi les oxydants typiques tels que le permanganate, le H_2O_2 , le chlore et le dioxyde de chlore. Il est principalement généré dans l'eau traitée par plasma à pression atmosphérique (EAP) par deux voies : (1) l' O_3 généré en phase gazeuse diffuse directement dans la phase liquide et (2) l' O_3 généré en phase liquide par décharge de plasma dans des bulles contenant de l'oxygène. Néanmoins, une étude antérieure a indiqué que la concentration d' O_3 peut être négligeable dans l'EAP en raison de ses réactions agressives avec l'oxyde nitrique et le dioxyde d'azote en phase gazeuse, et également avec les nitrites en phase liquide. ⁽¹⁷⁾
- Le superoxyde (O_2^-) est une autre espèce réactive de l'oxygène (ROS) importante générée lors du traitement de l'eau par plasma à pression atmosphérique. Il est principalement produit par (1) la réaction des électrons de haute énergie éjectés par le plasma avec les molécules d'oxygène, (2) la réaction des radicaux OH avec O_3 , et (3) la réaction secondaire du peroxynitrite en O_2^- et en oxyde nitrique. Une étude précédente a montré que O_2^- est essentiel à l'inactivation des bactéries car la valeur critique du pH pour les effets antimicrobiens est fortement liée à la constante de dissociation acide entre O_2^- et les radicaux hydroperoxy, qui interagissent tous deux et inactivent les cellules bactériennes. ⁽¹⁷⁾

6.2.2.2. Espèces réactives de l'azote (ERN)

- Les nitrites (NO_2^-) et les nitrates (NO_3^-) sont des espèces à longue durée de vie, générées comme produits secondaires dans l'eau pulvérisée. En milieu acide, les nitrites se dégradent et se protonent facilement en H_2O_2 , en oxyde nitrique et en dioxyde d'azote, composés considérés comme très toxiques pour les cellules. Les NO_2^- sont produits à partir d'oxydes d'azote (NO_x) générés par la réaction entre l'azote et l'oxygène en phase gazeuse lors du traitement plasma. ⁽¹⁷⁾

Lorsque les NO_2^- interagissent avec des agents oxydants tels que le H_2O_2 et l'ozone, ils peuvent se convertir en NO_3^- . Ainsi, la formation de NO_2^- et de NO_3^- dans l'eau pulvérisée

s'accompagne de la production d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), telles que le H_2O_2 . De plus, la production de NO_2^- et NO_3^- dans l'eau pulsée (EAP) est influencée par les conditions de traitement et le type de générateur de plasma utilisé. ⁽¹⁷⁾

- L'oxyde nitrique (NO) est une molécule de signalisation aux propriétés antimicrobiennes et biologiques importantes. Dans l'EAP, il se forme principalement via des réactions secondaires et se transforme rapidement en NO_2^- et NO_3^- en raison de sa faible stabilité dans l'eau. ⁽¹⁷⁾
- Le peroxyxynitrite (ONOO^-) est un oxydant puissant formé à partir de NO , NO_2^- et H_2O_2 . Il joue un rôle clé dans l'inactivation des micro-organismes et constitue une espèce majeure responsable des effets antimicrobiens de l'EAP. ⁽¹⁷⁾

7. Techniques de génération d'eau activées par plasma utilisant un plasma à pression atmosphérique:

Généralement, trois techniques principales sont couramment utilisées pour générer du plasma à pression atmosphérique destiné à la production d'eau pulvérisée (EAP) : (1) le jet de plasma, (2) la décharge à barrière diélectrique et (3) Décharge couronne.

7.1. Jet de plasma

Un jet de plasma stable et uniforme est généré lorsqu'une haute tension variable dans le temps est appliquée à l'électrode, et que son amplitude est suffisante pour ioniser le gaz comprimé qui circule dans le tube capillaire, comme illustré sur la figure 14. En général, les propriétés physico-chimiques de l'eau pulvérisée générée par le jet de plasma dépendent à la fois des paramètres physiques (géométrie du dispositif) et des paramètres de fonctionnement (types de gaz d'alimentation et leur débit, volume d'eau traitée, puissance électrique et durée du traitement). ⁽²⁰⁾

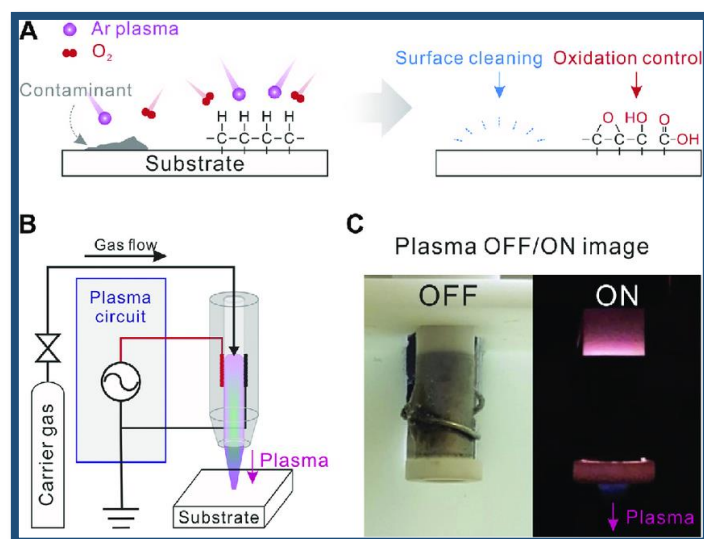


Figure16: Illustration du mécanisme d'activation de surface par plasma froid : (A) les espèces réactives issues du plasma interagissent avec la surface, éliminent les contaminants et introduisent des groupes oxygénés ; (B) schéma du dispositif expérimental de génération du

plasma dirigé vers le substrat ; (C) comparaison du système en mode OFF/ON montrant la formation du plasma et son effet sur la surface.⁽²⁰⁾

La production de l'eau activée par plasma (EAP) dépend fortement des paramètres de configuration et de fonctionnement du plasma jet. Les distances entre les électrodes, l'orifice et l'eau influencent directement la densité électronique et la formation des espèces réactives, notamment H_2O_2 , ainsi que les propriétés physico-chimiques comme la conductivité et l'ORP. De plus, les conditions opératoires telles que le type et le débit du gaz, la puissance électrique, le volume d'eau et la durée de traitement jouent un rôle essentiel dans la quantité et la nature des espèces réactives (ROS/RNS) produites, avec des effets parfois optimaux à des valeurs intermédiaires avant saturation. Ainsi, l'efficacité de la EAP est directement contrôlée par l'ensemble de ces paramètres qui déterminent sa composition et ses propriétés finales.⁽²⁰⁾

7.2. Décharge à barrière diélectrique

Contrairement au jet de plasma, la décharge à barrière diélectrique peut générer un plasma à pression atmosphérique directement dans l'air ambiant sans apport de gaz, comme illustré sur la Figure 16. Ainsi, la décharge à barrière diélectrique est adaptable à la production en masse de EAP. Pour la décharge à barrière diélectrique, les paramètres importants ayant une influence significative sur la concentration des espèces réactives dans l'EAP sont : (1) le matériau de l'électrode, (2) le matériau de la couche/du substrat diélectrique, (3) la distance entre les électrodes et (4) l'épaisseur de la couche/du substrat diélectrique. Concernant le premier paramètre, le matériau de l'électrode, en comparant l'argent, l'acier inoxydable et le laiton, en raison de la forte oxydation de l'argent, la décharge à barrière diélectrique avec des électrodes en argent peut conduire à des concentrations plus élevées d'émissions d'espèces réactives et de NO_3^- dans le PAW, mais à des concentrations plus faibles d' O_3 .⁽²⁰⁾

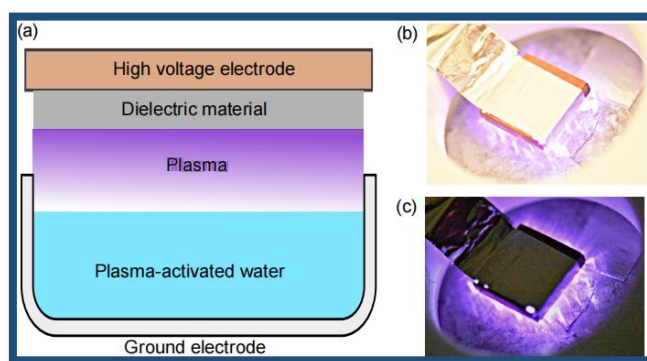


Figure17: La figure 17(a) illustre une décharge à barrière diélectrique (DBD) typique utilisée pour générer des ondes de photoplasma (PAW), constituée de deux électrodes séparées par un matériau diélectrique. Lorsqu'une haute tension est appliquée, des charges s'accumulent à la surface du matériau diélectrique, créant un champ électrique opposé qui limite le courant et empêche la formation d'étincelles. Ce champ électrique intense provoque l'effondrement du gaz et la formation d'un plasma. Les figures 15(b) et 15(c) montrent une DBD typique utilisant un substrat de verre comme barrière diélectrique.⁽²⁰⁾

7.3. Décharge couronne

La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz au voisinage d'un conducteur porté à une tension dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation. Ce type de décharge ne nécessite aucune source externe d'ionisation pour se développer, on dit que c'est une décharge auto-entretenu (autonome). Cependant, la présence d'un électron initial pour annoncer la décharge est nécessaire. La décharge couronne qui, habituellement, a lieu à pression atmosphérique est souvent associée à deux électrodes asymétriques. L'électrode active de faible rayon de courbure (une pointe ou un fil mince) est portée à un potentiel élevé. L'électrode passive de rayon de courbure important (une plaque plate ou un cylindre), est mise à la terre. La décharge peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode active. On rencontre une difficulté principale avec ce type de décharge qui est la transition à l'arc électrique. Les recherches antérieures ont conduit à distinguer deux processus de développement de la décharge :

- Le premier est la décharge de Townsend qui fait intervenir tout l'intervalle interélectrodes.
- Le second correspond à l'apparition de lueurs dans l'intervalle prenant de filament ce qu'on appelle streamer. ⁽²⁰⁾

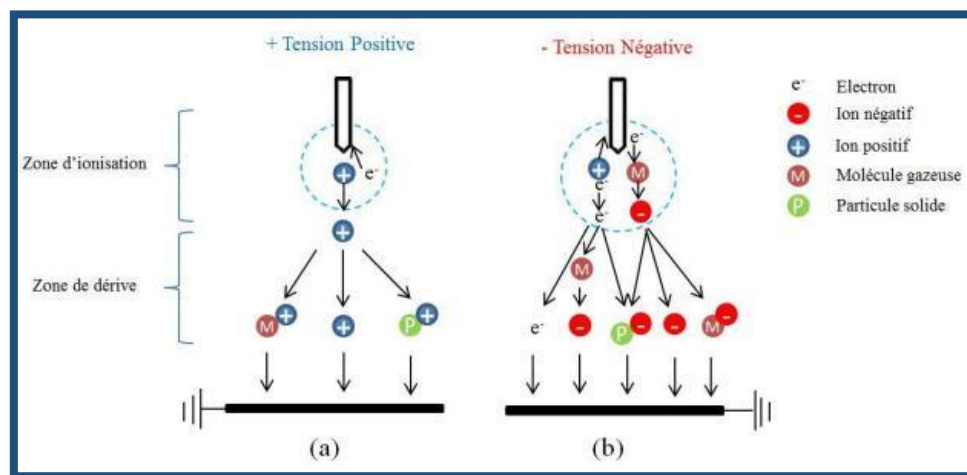


Figure18: Représentation schématisée d'une décharge couronne en configuration pointe plaque : (a) tension positive et (b) tension négative. ⁽²⁰⁾

8. Avantages et applications d'EAP

8.1. Décontamination par plasma froid

Depuis les années 1990, les recherches sur la décontamination par plasma se sont développées, notamment pour les applications médicales et alimentaires. L'un des principaux avantages du plasma froid réside dans sa capacité à générer des électrons hautement énergétiques produisant diverses espèces réactives, tout en limitant l'élévation de température (souvent inférieure à 70 °C). Cette caractéristique permet le traitement de matériaux thermosensibles sans altération, contrairement aux méthodes conventionnelles. ⁽³¹⁾

Dans ce contexte, l'eau activée par plasma (EAP), riche en espèces réactives, a fait l'objet de nombreuses études pour ses propriétés antimicrobiennes. Elle s'est révélée efficace contre un large éventail de micro-organismes, notamment les bactéries planctoniques (comme *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* ou *Salmonella*), les biofilms, les champignons et les virus. Elle permet également l'inactivation des spores fongiques et l'altération des structures virales (ADN/ARN), y compris la protéine Spike du SARS-CoV-2.⁽⁸⁾

Cependant, l'efficacité de l'EAP dépend de plusieurs facteurs. Les bactéries Gram-négatives sont généralement plus sensibles que les Gram-positives en raison de leur paroi cellulaire plus fine. Les biofilms présentent une résistance accrue du fait de leur matrice protectrice, tandis que les champignons et levures, en tant qu'eucaryotes, sont également plus résistants. Par ailleurs, la nature de la surface influence fortement l'efficacité du traitement : les surfaces rugueuses limitent la pénétration des espèces réactives.

Enfin, l'EAP a démontré un fort potentiel dans l'industrie alimentaire pour la décontamination de produits frais et transformés (fruits, légumes, viandes, tofu), avec un impact minimal sur leurs propriétés. Son efficacité est liée à la concentration en espèces réactives (comme H_2O_2 , nitrites et nitrates), ce qui en fait une technologie prometteuse, écologique et adaptable.⁽³⁸⁾

8.2. Applications antifongiques et antivirales

Si la plupart des recherches sur le plasma se concentrent sur ses effets bactéricides, son potentiel contre les champignons et les virus suscite également un intérêt croissant.

Les principaux mécanismes attribués à cette efficacité comprennent la perturbation des parois cellulaires fongiques et l'interférence avec leurs processus métaboliques. Par exemple, des études récentes ont mis en évidence l'efficacité du plasma contre les champignons dermatophytes, les biofilms de *Candida albicans* et *Aspergillus chevalieri*. La génération de ROS/RNS à partir du plasma perturbe les enveloppes virales et entrave leur réplication, offrant un large spectre d'activité contre les virus entériques tels que le norovirus, l'adénovirus et le virus de l'hépatite A, le HSV-1 et les bactériophages comme MS2, T4 et ϕ X174.

De manière significative, ont démontré sa capacité à réduire considérablement l'infectiosité des pseudovirus de type SARS-CoV-2.

Par ailleurs, les travaux de Upadrasta et al. (2023) ont étudié l'efficacité du brouillard activé par plasma en utilisant des virus modèles du SARS-CoV-2. De plus, un essai clinique mené sur une période de 80 jours à l'hôpital général de Nicosie a évalué l'impact du plasma froid sur la réduction de la charge virale dans les services dédiés à la COVID-19. Les résultats ont montré que les dispositifs à plasma, notamment lorsqu'ils sont associés à des émetteurs d'ions, permettent une neutralisation efficace du virus.⁽²⁶⁾

8.3. Améliorer la sécurité alimentaire

Les propriétés antimicrobiennes d'EAP sont particulièrement avantageuses dans le domaine de la décontamination alimentaire. Le stress oxydatif induit par les espèces réactives de l'oxygène telles que le peroxyde d'hydrogène est efficace pour réduire les populations d'agents pathogènes et d'organismes d'altération sur les produits frais et autres aliments. Cela

prolonge la durée de conservation de ces produits tout en préservant leur sécurité et leur qualité. Contrairement aux désinfectants chimiques, EAP ne laisse pas de résidus toxiques, ce qui en fait un choix plus sûr pour traiter les consommables.⁽¹⁷⁾

8.4. Favoriser la croissance des plantes

En plus de son rôle dans la germination, il a été démontré que l'EAP favorise la croissance et la vitalité globales des plantes. La présence de composés bioactifs tels que le nitrate et le peroxyde d'hydrogène peut stimuler les processus métaboliques des plantes, entraînant une croissance accélérée et une résilience accrue contre les maladies et les stress environnementaux. Cette stimulation améliore non seulement la productivité agricole, mais soutient également les pratiques agricoles durables en réduisant le besoin de stimulateurs de croissance chimiques et de pesticides.⁽¹⁷⁾

9. Interaction entre la magnétisation et le plasma froid

Des expériences préliminaires en laboratoire ont été réalisées afin d'évaluer le potentiel des plasmas magnétisés pour la protection des engins spatiaux. Dans ces expériences, un plasma hydrogénoïde à écoulement rapide interagit avec une structure de champ magnétique dipolaire. Les observations en lumière visible ont montré que le faisceau de plasma est dévié et forme une fine enveloppe annulaire, dont la région interne apparaît pratiquement dépourvue de plasma. Les mesures effectuées à l'aide de sondes de Langmuir ont confirmé cette structure spatiale et ont révélé que les gradients à la limite de la cavité diamagnétique sont caractérisés par des longueurs d'échelle nettement inférieures aux rayons de Larmor ioniques. Par ailleurs, les mesures du potentiel flottant indiquent que les ions sont principalement confinés par des effets électrostatiques.

Une première modélisation hybride réalisée à l'aide du code d'Hybrid a montré une excellente concordance avec les résultats expérimentaux, en reproduisant fidèlement la distance d'arrêt du plasma ainsi que la structure globale de la cavité diamagnétique. De plus, les dimensions de la barrière de transport obtenues numériquement sont cohérentes avec les observations expérimentales, restant inférieures au rayon de Larmor des ions énergétiques. Ces résultats mettent en évidence le rôle essentiel de la cinétique des particules dans la formation des barrières de transport du plasma au sein des mini-magnétosphères artificielles.

Les travaux futurs viseront à approfondir ces résultats, notamment en étudiant l'influence de l'intensité du champ magnétique sur la taille de la cavité diamagnétique, ainsi que les propriétés de stabilité et de micro-turbulence au niveau de la barrière de transport. En outre, bien que les cartographies bidimensionnelles de la densité et du potentiel aient permis une première caractérisation du système, certaines zones, telles que les cusps polaires, nécessitent des analyses tridimensionnelles plus détaillées.

Enfin, l'expérience LinX, ainsi que des dispositifs similaires, constitue une plateforme expérimentale prometteuse pour l'étude des phénomènes fondamentaux de la physique des plasmas en lien avec des contextes astrophysiques. Grâce à une mise à l'échelle appropriée

des paramètres sans dimension, ces systèmes pourraient jouer un rôle clé dans la compréhension et la validation des modèles avancés des mini-magnétosphères artificielles. ⁽²⁰⁾

En conclusion, le plasma froid constitue une technologie innovante et prometteuse pour le traitement de l'eau grâce à sa capacité à générer des espèces réactives efficaces sans élévation importante de la température. Les études ont montré que l'interaction plasma-liquide permet d'éliminer divers contaminants, offrant ainsi une alternative écologique aux méthodes classiques.

Cependant, des défis subsistent, notamment le passage à l'échelle industrielle, la complexité des mélanges de polluants réels et la détermination de la dose optimale de plasma. Malgré cela, les avancées actuelles confirment le fort potentiel de cette technologie, en particulier avec le développement de réacteurs performants et l'optimisation de l'interface plasma-liquide.

Ainsi, le plasma froid représente une solution d'avenir nécessitant encore des recherches pour une application industrielle efficace.

Chapitre 04 :

Métabolisme et biotoxicité

Le métabolisme regroupe l'ensemble des réactions biochimiques essentielles au fonctionnement cellulaire, tandis que la biotoxicité correspond aux effets néfastes des substances toxiques sur les organismes vivants. Ces deux notions sont étroitement liées, car le métabolisme intervient à la fois dans la bioactivation des toxiques et leur détoxification, notamment via des systèmes enzymatiques spécialisés.

Ainsi, toute perturbation des voies métaboliques peut entraîner un stress oxydatif et des dommages cellulaires. L'étude de l'interaction entre métabolisme et biotoxicité est donc essentielle pour comprendre les effets des toxiques et développer des approches de prévention efficaces.

1. Généralité sur le métabolisme:

1.1. Définition du métabolisme:

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent dans l'organisme, permettant à l'être vivant de se maintenir en vie, de se développer, de se reproduire et de répondre aux stimuli de son environnement ⁽⁵⁵⁾, et il occupe une place centrale dans la vie de la cellule puisqu'il assure la production de l'énergie et des éléments nécessaires à partir des nutriments disponibles dans le milieu, tels que le glucose, les acides aminés et le dioxygène ⁽³³⁾.

Ces nutriments peuvent être utilisés directement ou transformés en molécules essentielles, telles que les nucléotides pour l'ADN, les protéines, les lipides, ou encore stockés sous forme de réserves énergétiques comme le glycogène ou l'amidon ⁽²⁾. Par ailleurs, le métabolisme permet la production d'énergie, principalement sous forme d'ATP (adénosine triphosphate), indispensable au bon fonctionnement des activités cellulaires ⁽³⁷⁾.

Il constitue ainsi un réseau complexe de réactions biochimiques catalysées par des enzymes, fortement interconnectées, où le produit d'une réaction devient le substrat d'une autre, formant des voies métaboliques organisées ⁽³³⁾. Enfin, bien que certaines réactions puissent se dérouler en dehors des cellules, comme la digestion ou le transport, la majorité a lieu à l'intérieur de celles-ci et correspond au métabolisme intermédiaire ⁽⁵⁵⁾.

1.2. Types du métabolisme:

1.2.1. L'anabolisme:

L'anabolisme correspond à l'ensemble des réactions enzymatiques de biosynthèse permettant la formation de macromolécules ou de leurs précurseurs à partir de composés plus simples, construits progressivement étape par étape ⁽³⁾. Il regroupe ainsi les voies métaboliques qui utilisent l'énergie, principalement sous forme d'ATP, ainsi que le pouvoir réducteur (NADH, NAD(P)H et FADH₂), généralement produits par le catabolisme, afin de synthétiser des biomolécules complexes nécessaires aux structures et aux fonctions cellulaires ^(7;55).

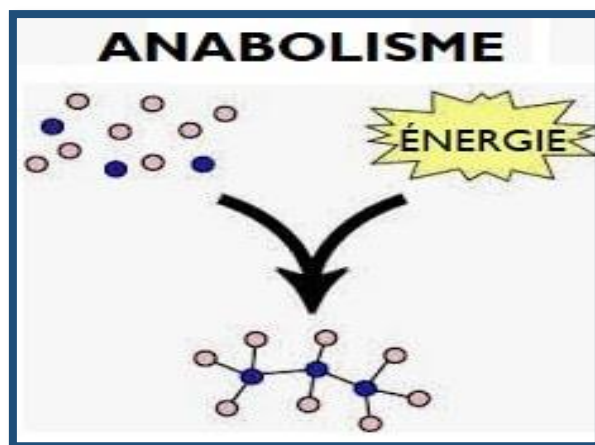


Figure 19: Représentation schématique du processus d'anabolisme, où l'énergie est utilisée pour lier des molécules simples et former des composés plus complexes, reflétant le rôle essentiel de ce processus dans la croissance et le renouvellement cellulaires.⁽⁷⁾

1.2.2. Le catabolisme:

Le catabolisme correspond à l'ensemble des réactions enzymatiques de dégradation des macromolécules en molécules de plus faible taille, incluant notamment la dégradation et l'oxydation des nutriments^(3,4). Ces processus s'accompagnent d'une libération d'énergie libre, dont une partie est conservée sous forme d'ATP et de transporteurs d'électrons réduits tels que le NAD(P)H et le FADH₂⁽⁷⁾. Ainsi, le catabolisme joue un rôle essentiel en fournissant à la cellule l'énergie nécessaire ainsi que les constituants élémentaires indispensables à son métabolisme et à son fonctionnement⁽⁵⁵⁾.

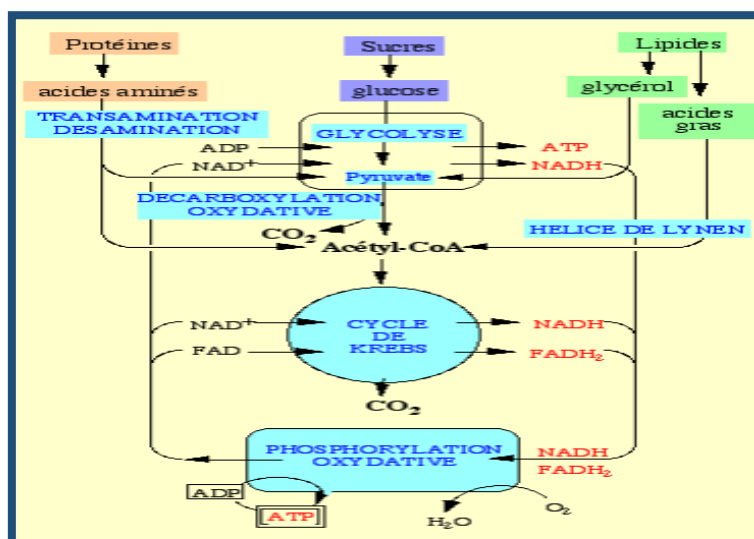


Figure 20: Un schéma intégré des voies cataboliques (Catabolisme) illustre comment les protéines, les sucres et les graisses sont décomposés en molécules plus simples qui entrent dans des voies centrales telles que la glycolyse, le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative, conduisant à la production d'énergie sous forme d'ATP.⁽⁵⁵⁾

1.3. Les voies métaboliques principale:

Les voies métaboliques correspondent à un ensemble de réactions biochimiques successives permettant la formation d'un composé biologique essentiel au bon fonctionnement de l'organisme. Elles sont constituées de plusieurs étapes, chacune étant catalysée par une enzyme spécifique, sachant qu'une même enzyme peut intervenir dans différentes voies métaboliques. Lorsque le métabolisme d'un composé fait intervenir un grand nombre de réactions et plusieurs points de convergence (carrefours métaboliques), sa synthèse globale résulte d'un enchaînement de plusieurs voies métaboliques interconnectées. Dans l'ensemble de ces réactions constituant le métabolisme, on distingue :

1.3.1. Métabolisme du glucose (La glycolyse):

La glycolyse est une voie métabolique qui se déroule entièrement dans le cytoplasme, en faisant intervenir uniquement des enzymes solubles, et ne nécessitant pas la présence d'oxygène ⁽⁷⁾. Elle a pour rôle de dégrader le glucose, une molécule à six atomes de carbone, en deux molécules de pyruvate à trois atomes de carbone ^(33;7). Ce processus s'effectue en une série de dix réactions enzymatiques organisées en trois étapes fonctionnelles : la conversion du glucose en fructose 1,6-bisphosphate, le clivage de cet hexose en deux molécules de glycéraldéhyde-3-phosphate, puis l'oxydation de ces trioses en pyruvate ⁽⁷⁾.

Au cours de cette dégradation, la glycolyse permet la production d'énergie sous forme d'ATP ainsi que de NADH, avec un rendement énergétique net de deux molécules d'ATP par molécule de glucose métabolisée, grâce notamment à la phosphorylation au niveau du substrat ^(33; 7).

1.3.2. Voie des pentoses phosphates:

La voie des pentoses phosphates (PP) est une voie métabolique importante dérivée de la glycolyse, dont le glucose-6-phosphate (G6P) est le point de départ. Le G6P est produit lors de la première étape de la glycolyse ^(38,55). Une partie du G6P issu de la glycolyse est ainsi détournée pour alimenter cette voie, qui se déroule en deux phases principales : une phase oxydative et une phase non oxydative ⁽³⁸⁾.

La phase oxydative permet la production d'énergie réduite sous forme de NADPH, essentiel pour lutter contre le stress oxydatif. Au cours de cette phase, le substrat initial est converti en ribulose-5-phosphate (R5P) avec perte d'un atome de carbone ⁽³⁸⁾. Ce composé peut ensuite être converti en ribose-5-phosphate, un précurseur clé de la synthèse des nucléotides, ainsi qu'en d'autres intermédiaires tels que l'érythrose-4-phosphate, impliqué dans la biosynthèse de certains acides aminés ⁽⁵⁵⁾.

Durant la phase non oxydative, diverses réactions de conversion croisée permettent la formation de métabolites tels que le fructose-6-phosphate (F6P) et le glycéraldéhyde-3-phosphate (G3P), qui peuvent être recyclés dans la voie de la glycolyse pour la production d'énergie ou utilisés dans diverses voies de biosynthèse ^(38, 55).

Ainsi, la voie des pentoses phosphates joue un rôle crucial à la fois dans la production de NADPH et dans la synthèse des précurseurs essentiels au métabolisme cellulaire.

1.3.3. Cycle de Krebs:

Le cycle de Krebs, également appelé cycle de l'acide citrique ou cycle des acides tricarboxyliques (ATC), est une voie centrale du métabolisme aérobie se déroulant principalement dans la mitochondrie des cellules eucaryotes ^(6,55). Il constitue une étape clé du catabolisme, assurant l'oxydation complète de l'acétyl-CoA en dioxyde de carbone (CO_2) ⁽⁶⁾. L'acétyl-CoA, considéré comme un carrefour métabolique, provient de plusieurs voies, notamment de la décarboxylation oxydative du pyruvate, de la β -oxydation des acides gras ainsi que de la dégradation de certains acides aminés, ce qui fait du cycle de Krebs une voie commune au catabolisme des glucides, des lipides et des protéines ⁽⁶⁾. Le pyruvate, issu notamment de la glycolyse, pénètre dans la mitochondrie où il est transformé en acétyl-CoA par le complexe pyruvate déshydrogénase avant d'entrer dans le cycle ⁽⁵⁵⁾.

Au cours de ce cycle, des coenzymes réduits tels que le NADH et le FADH_2 sont produits ; ils seront ensuite utilisés par la chaîne respiratoire, en présence de dioxygène, pour générer de l'ATP ⁽²⁾. Ainsi, bien que le cycle de Krebs ne produise pas directement de grandes quantités d'ATP, il joue un rôle majeur dans la production énergétique cellulaire, contribuant indirectement à la synthèse d'une quantité importante d'ATP ^(6;55).

Enfin, le cycle de Krebs est étroitement connecté à de nombreuses autres voies métaboliques, certains de ses intermédiaires servant à la biosynthèse de molécules essentielles telles que les acides aminés ou les nucléotides ⁽⁵⁵⁾.

1.3.4. Chaîne respiratoire:

La chaîne respiratoire est encore appelée système de transport des électrons. C'est la voie finale de l'oxydation des oses, comportant une série de composés qui transportent les électrons d'un donneur (Coenzyme réduit NADH, FADH_2) à un accepteur final (l'oxygène moléculaire) via une série de réactions de réduction couplées au transport des protons entraînant ainsi la conversion de l'énergie potentielle libérée par les électrons en énergie biologiquement utilisable. La chaîne respiratoire mitochondriale est constituée d'un ensemble de 4 complexes enzymatiques dont chacun est constitué de plusieurs sous unités protéiques. Le nombre de sous unités varie selon le complexe. ⁽²⁸⁾

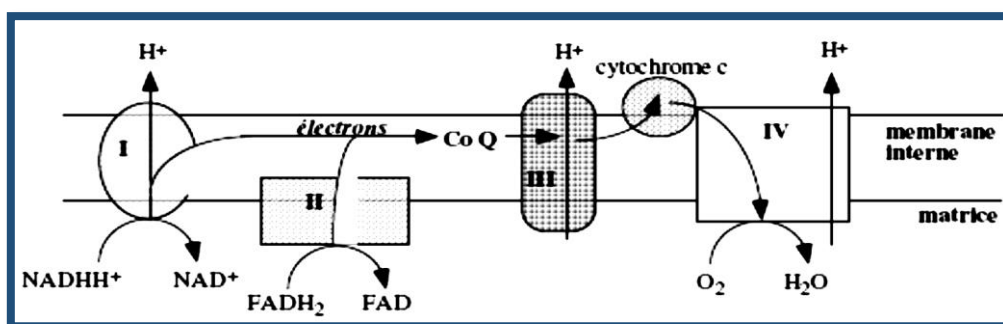


Figure21: Représentation schématique de la chaîne respiratoire mitochondriale, où les électrons sont transférés des cofacteurs réducteurs (NADH, FADH_2) à travers de multiples complexes enzymatiques dans la membrane mitochondriale interne, ce qui entraîne un pompage de protons et la formation d'une force motrice de protons utilisée dans la

phosphorylation oxydative pour produire de l'ATP, l'oxygène étant l'accepteur final d'électrons et de l'eau étant formée. ⁽²⁸⁾

1.3.5. Synthèse des protéine:

La synthèse des protéines, également appelée traduction, est assurée dans chaque cellule par des machines moléculaires très sophistiquées : les ribosomes. Compte tenu de l'immense quantité de données biologiques à traiter, il arrive régulièrement que ces machines se bloquent et mettent en péril la survie de la cellule. Chez les bactéries, le principal processus de sauvetage des ribosomes bloqués est la trans-traduction. Il est assuré par un acide ribonucléique (ARN) hybride, l'ARN transfert-messenger (ARNtm), associé à une petite protéine basique, SmpB (small protein B). Plusieurs autres systèmes de contrôle qualité ont récemment été mis en évidence, révélant un réseau de maintien de la survie cellulaire très sophistiqué. Cette machinerie du contrôle qualité de la synthèse protéique est une cible très prometteuse pour le développement de futurs antibiotiques. ⁽⁵⁰⁾

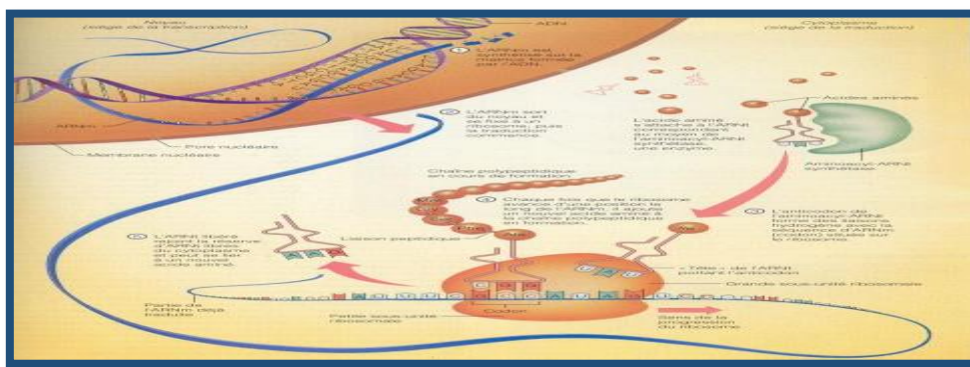


Figure22: La figure illustre une voie de contrôle de la qualité de la synthèse protéique au sein de la cellule. Les protéines incomplètes ou défectueuses sont détectées lors de la traduction et dirigées vers la dégradation ou leur traitement plutôt que leur accumulation. Le texte met l'accent sur le rôle des cofacteurs (tels que SmpB) dans un mécanisme de réparation/correction qui contribue à garantir l'intégrité des protéines, faisant de ce système une cible potentielle pour le développement de nouvelles thérapies. ⁽⁵⁰⁾

1.4. Régulation métabolique:

La régulation métabolique regroupe l'ensemble des mécanismes permettant à la cellule de contrôler l'activité de ses voies métaboliques selon ses besoins énergétiques et les conditions du milieu. Elle assure ainsi le maintien de l'équilibre cellulaire et l'optimisation de l'utilisation des nutriments. Elle comprend différents types de régulation, notamment enzymatique, allostérique, hormonale et génétique.

1.4.1. Régulation enzymatique:

Les organismes doivent être capables de moduler l'activité enzymatique cellulaire de façon à s'adapter aux changements métaboliques. De cette façon, les enzymes peuvent coordonner les voies métaboliques, en fonction de l'environnement. Les deux moyens principaux sont :

- a- Le contrôle de la quantité d'enzyme. La quantité d'enzyme dans une cellule est dépendante du taux de synthèse de l'enzyme et de son taux de dégradation. Des systèmes complexes

de régulation de la transcription et/ou de la traduction des gènes codant pour des enzymes ont été développés durant l'évolution et modulent la quantité d'enzyme en réponse à des conditions physiologiques changeantes. Par exemple, l'enzyme qui permet l'hydrolyse du lactose n'est synthétisée que lorsque le milieu de culture contient du lactose.

- b- Le contrôle de l'activité enzymatique. L'activité catalytique des enzymes peut être directement modifiée par des altérations structurales et conformationnelles. Ainsi, la modulation de l'affinité de l'enzyme pour son substrat permettra de changer le taux de catalyse. L'affinité d'association peut être changée par la présence de protéines ou de sous-unités régulatrices, par une modification covalente (en général une phosphorylation), une activation protéolytique et/ou une régulation allostérique.⁽²⁾

1.4.2. Régulation allostérique:

Outre la concentration d'enzyme, la vitesse d'une réaction dépend aussi de l'activité de l'enzyme.

L'activité d'une enzyme est sa capacité à transformer les substrats en produits. Cette activité peut être modifiée de différentes façons. Les transformations post-traductionnelles en sont un exemple : la glycogène synthase est inhibée lorsqu'elle est phosphorylée. Une autre façon de modifier l'activité d'une enzyme réside dans les *régulations allostériques*.

D'après le concept formalisé par Monod, Wyman

et Changeux dans les années 60, une enzyme allostérique a plusieurs sites : des *sites actifs* où se fixent les substrats et des *sites régulateurs* où peuvent se fixer d'autres molécules. Ces molécules sont appelées *régulateurs* et ont pour effet de modifier l'activité de l'enzyme. Cela peut être une augmentation de l'activité de l'enzyme : on parle alors d'*activation* et le régulateur est un *activateur*, ou une diminution :

on parle alors d'*inhibition* et le régulateur est un *inhibiteur*. Les deux effets peuvent même se conjuguer.⁽²⁾

1.4.3. Régulation hormonal:

La régulation hormonale résulte de la transduction d'un signal chimique en réponses intracellulaires, conduisant notamment à la mobilisation du glycogène. Les mécanismes d'action de l'adrénaline et du glucagon sont similaires après leur fixation sur des récepteurs membranaires spécifiques, déclenchant ainsi une cascade de réactions enzymatiques.

Lorsque la glycémie diminue, le glucagon est sécrété et agit sur le foie afin de stimuler la libération de glucose dans le sang. De même, lors d'un stress ou d'un effort (réaction de fuite ou de lutte), l'adrénaline est libérée et agit sur le foie ou le muscle pour accélérer la dégradation du glycogène en glucose, répondant ainsi aux besoins énergétiques des cellules.

Le mécanisme d'action de ces hormones repose sur plusieurs étapes successives : la liaison hormone-récepteur active l'adénylate cyclase membranaire, qui catalyse la formation de l'AMP cyclique (AMPc) à partir de l'ATP. L'AMPc agit comme second messenger en activant la protéine kinase A (PKA), par dissociation de ses sous-unités régulatrices et catalytiques. La PKA active phosphoryle ensuite la glycogène phosphorylase kinase, qui à son tour active la glycogène phosphorylase (passage de la forme b à la forme a). Cette dernière catalyse la dégradation du glycogène en glucose-1-phosphate, permettant ainsi la mobilisation rapide des réserves énergétiques.⁽⁵⁶⁾

1.4.4. Régulation de l'expression génique:

Les acides gras polyinsaturés, leurs esters de Co-enzyme A (CoA), ainsi que leurs dérivés eicosanoïdes sont des régulateurs d'un grand nombre de gènes par l'intermédiaire de l'activation de facteurs de transcription. Parmi ces facteurs de transcription, on trouve classiquement les PPAR (peroxisome proliferator activated receptors), le récepteur aux rétinoïdes RXR (retinoid X receptor), le récepteur hépatique LXR (liver X receptor) ou encore les SREBP (sterol regulatory element- binding proteins). Récemment, d'autres facteurs de transcription comme le NF- B (nuclear factor-kappa B) ont été identifiés comme étant régulés par les AGPI. Outre l'activation de facteurs de transcription, les AGPI semblent aussi moduler, par des mécanismes encore mal décrits, l'expression de gènes impliqués dans la réponse inflammatoire, tels que le TLR4 (Toll-like receptor 4) ou les PPA (protéines de phase aiguë). ⁽²⁾

2. Concepts de biotoxicité:

Les organismes vivants sont continuellement exposés à divers agents potentiellement nocifs présents dans leur environnement. Ces interactions peuvent entraîner des perturbations au niveau cellulaire et métabolique, affectant ainsi le fonctionnement normal des systèmes biologiques. Dans ce contexte, l'étude de la biotoxicité s'avère essentielle pour comprendre les effets de ces agents et les mécanismes de réponse des organismes.

2.1. Définition du biotoxicité:

La biotoxicologie est une branche de la toxicologie qui étudie les effets nocifs des toxines d'origine biologique sur les organismes vivants ⁽²⁹⁾. Elle se concentre sur l'analyse des biotoxines, composés chimiques naturellement produits par des organismes tels que les micro-organismes, les plantes et certains animaux ⁽²⁾, et susceptibles d'induire des modifications importantes aux niveaux cellulaire, biochimique et moléculaire ⁽²⁹⁾.

Bien que ces biotoxines ne soient ni infectieuses ni reproductibles ⁽²⁾, elles présentent une toxicité élevée, même à très faibles doses ⁽²⁹⁾. Elles sont généralement classées, selon leur masse moléculaire, en toxines de faible masse moléculaire (LMW) et toxines de masse moléculaire élevée (HMW) ⁽²⁾.

Dans ce contexte, la biotoxicologie vise également à comprendre les mécanismes d'action de ces substances et leurs effets fonctionnels, notamment neurologiques, comportementaux et immunologiques ⁽²⁹⁾, ainsi que la relation entre la dose d'exposition et la réponse biologique ⁽²⁹⁾. Enfin, elle joue un rôle crucial dans l'évaluation des risques pour la santé humaine, animale et environnementale ⁽²⁾.

2.2. Type de biotoxicité:

Compte tenu de la multiplicité des formes de biotoxines et de la diversité de leurs effets sur les organismes vivants, il est devenu essentiel de les classer selon des critères scientifiques précis mettant en évidence leurs caractéristiques distinctes. Cette classification permet une meilleure compréhension du comportement variable de ces toxines en fonction de leur origine, de leur mécanisme d'action, des organes cibles, ainsi que de la durée et de l'intensité

de leurs effets. Sur cette base, les biotoxines peuvent être divisées en plusieurs types principaux, facilitant ainsi leur étude et l'analyse de leurs effets biologiques.

2.2.1. Selon l'origine:

2.2.1.1. Les toxines naturelles:

Les toxines naturelles sont définies comme des substances toxiques produites naturellement par des organismes vivants tels que les plantes, les champignons ou les animaux, et pouvant provoquer des effets nocifs chez l'homme après exposition.

- a. **Aflatoxine:** L'aflatoxine est une mycotoxine produite par des champignons du genre *Aspergillus*, et constitue l'une des substances les plus cancérogènes, en particulier au niveau du foie.
- b. **Alcaloïdes:** Les alcaloïdes sont des composés naturels azotés produits par les plantes comme mécanisme de défense, et agissent principalement sur le système nerveux.
- c. **Venins animaux:** Les venins sont des substances toxiques produites par certains animaux tels que les serpents et les scorpions, contenant des protéines et des enzymes qui affectent les systèmes nerveux ou sanguin. ⁽²⁹⁾

2.2.1.2. Les toxines synthétiques:

Les toxines synthétiques sont des substances chimiques produites ou modifiées par l'homme à des fins industrielles, agricoles ou médicales, et pouvant entraîner des effets toxiques en cas d'exposition.

- **Pesticides:** Les pesticides sont des substances chimiques utilisées pour lutter contre les organismes nuisibles en agriculture, et peuvent affecter le système nerveux ou endocrinien en cas d'exposition prolongée
- **Métaux lourds:** Les métaux lourds, tels que le plomb, le mercure et le cadmium, sont des éléments chimiques capables de s'accumuler dans l'organisme et de provoquer une toxicité chronique.
- **Médicaments à effet toxique:** Certains médicaments peuvent induire des effets indésirables lorsqu'ils sont utilisés à fortes doses ou sur une longue durée, notamment au niveau du foie ou des reins. ⁽²⁹⁾

2.2.2. selon l'organe cible:

Les toxines peuvent être classées en fonction de l'organe ou du système biologique qu'elles affectent de manière prédominante. Cette classification est essentielle en toxicologie, car elle permet de relier la nature de la substance toxique à ses effets physiopathologiques spécifiques, facilitant ainsi le diagnostic, la prévention et la prise en charge des intoxications. En effet, chaque organe possède une sensibilité particulière aux toxiques en raison de son rôle métabolique et de son exposition aux xénobiotiques.

- **Hépatotoxiques:** Les hépatotoxines sont des substances capables d'induire des lésions structurelles et fonctionnelles du foie. Elles perturbent les processus métaboliques, notamment la biotransformation des xénobiotiques, et peuvent entraîner des phénomènes tels que la nécrose, la stéatose ou la fibrose hépatique. Le foie étant

l'organe principal de détoxification, il est particulièrement vulnérable à l'accumulation des substances toxiques.

- **Néphrotoxiques:** Les néphrotoxines affectent les reins en altérant les fonctions essentielles de filtration glomérulaire, de réabsorption et d'excrétion. Elles peuvent provoquer des lésions des tubules rénaux, une insuffisance rénale aiguë ou chronique, et une accumulation de déchets métaboliques dans l'organisme. La forte irrigation sanguine des reins les rend particulièrement exposés aux toxiques circulants.
- **Neurotoxiques:** Les neurotoxines sont des substances qui interfèrent avec le fonctionnement du système nerveux central ou périphérique. Elles peuvent perturber la transmission synaptique, modifier l'activité des neurotransmetteurs ou induire la mort des neurones. Ces effets peuvent se manifester par des troubles moteurs, cognitifs ou sensoriels, selon la nature et la durée d'exposition au toxique.
- **Hématotoxiques:** Les hématotoxines affectent les composants du sang, notamment les globules rouges, les globules blancs et les plaquettes. Elles peuvent perturber l'hématopoïèse au niveau de la moelle osseuse, entraîner des anomalies de la coagulation ou provoquer des maladies comme l'anémie ou la leucopénie. ⁽²⁹⁾

2.2.3. selon le mécanisme d'action:

La classification des toxines selon leur mécanisme d'action repose sur l'étude des interactions entre les substances toxiques et les structures cellulaires ou moléculaires. Elle permet de comprendre comment ces substances induisent des altérations biologiques, en ciblant des processus spécifiques tels que l'activité enzymatique, l'intégrité de l'ADN ou l'équilibre oxydatif. Cette approche est fondamentale pour expliquer les effets toxiques et développer des stratégies de prévention.

- **Toxines oxydatives (Stress oxydatif):** Ces toxines induisent une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), dépassant les capacités antioxydantes de la cellule. Ce déséquilibre entraîne des dommages aux lipides membranaires, aux protéines et à l'ADN, contribuant ainsi à la mort cellulaire et au développement de diverses pathologies
- **Toxines génotoxiques (Génotoxicité):** Les toxines génotoxiques sont capables d'interagir directement ou indirectement avec le matériel génétique, provoquant des mutations, des cassures de l'ADN ou des altérations chromosomiques. Ces effets peuvent conduire à des dysfonctionnements cellulaires, voire au développement de cancers.
- **Toxines enzymatiques:** Ces toxines agissent en inhibant ou en modifiant l'activité des enzymes essentielles au métabolisme cellulaire. Cette inhibition peut perturber des voies métaboliques clés, entraînant un dysfonctionnement cellulaire et, dans certains cas, la mort de la cellule. ⁽²⁹⁾

2.2.4. selon la durée d'exposition:

Cette classification repose sur la durée et la fréquence d'exposition à une substance toxique, ainsi que sur la rapidité d'apparition des effets biologiques. Elle est essentielle pour évaluer les risques liés aux expositions environnementales ou professionnelles.

- **Toxicité aiguë:** La toxicité aiguë résulte d'une exposition unique ou de courte durée à une dose élevée de toxique. Elle se caractérise par une apparition rapide des symptômes, pouvant aller de troubles légers à des effets graves, voire mortels.

- **Toxicité chronique:** La toxicité chronique est liée à une exposition prolongée et répétée à de faibles doses de substances toxiques. Elle se manifeste par des effets progressifs et souvent irréversibles, tels que des maladies dégénératives ou des cancers.⁽²⁹⁾

2.2.5. selon la nature de l'effet biologique:

Les toxines peuvent être classées selon la nature spécifique de leurs effets sur l'organisme, notamment leur capacité à induire des maladies graves ou des altérations du développement.

- **Cancérogènes:** Les substances cancérogènes sont capables d'induire la formation de tumeurs malignes en altérant les mécanismes de régulation de la prolifération cellulaire et en provoquant des mutations génétiques.
- **Tératogènes:** Les agents tératogènes provoquent des anomalies du développement embryonnaire ou fœtal, en perturbant les processus de différenciation et de croissance cellulaire pendant la grossesse.
- **Reprotoxiques:** Les substances reprotoxiques affectent la fertilité et le système reproducteur, en altérant la production des gamètes ou le fonctionnement hormonal.⁽²⁹⁾

2.2.6. selon la voie d'exposition:

Cette classification repose sur les différentes voies par lesquelles les toxines pénètrent dans l'organisme, influençant ainsi leur distribution et leur toxicité.

- **Ingestion:** L'ingestion correspond à l'entrée des substances toxiques par voie digestive, généralement via l'alimentation ou l'eau contaminée, entraînant leur absorption au niveau du tractus gastro-intestinal.
- **Inhalation:** L'inhalation implique l'introduction de toxines sous forme de gaz, vapeurs ou particules dans les voies respiratoires, avec une absorption rapide au niveau pulmonaire.
- **Voie cutanée:** La voie cutanée correspond à la pénétration des toxines à travers la peau, souvent lors d'un contact direct avec des substances chimiques.⁽²⁹⁾

2.3. Mécanismes d'action toxique:

Les mécanismes d'action toxique regroupent l'ensemble des processus par lesquels une substance toxique exerce ses effets néfastes sur un organisme vivant. Ces mécanismes impliquent une série d'interactions complexes débutant au niveau moléculaire, se propageant à l'échelle cellulaire et tissulaire, et se traduisant finalement par des altérations fonctionnelles au niveau des organes et de l'organisme entier. Ils dépendent de plusieurs facteurs, notamment la nature de la toxine, la dose, la durée d'exposition et la sensibilité de l'organisme.

2.3.1. Mécanismes d'action moléculaire des toxines

Les mécanismes d'action moléculaire des toxines correspondent aux interactions directes entre les substances toxiques et les cibles biologiques au niveau moléculaire, telles que les protéines, les lipides et les acides nucléiques. Ces interactions perturbent les fonctions cellulaires essentielles et déclenchent une cascade d'événements biochimiques pouvant conduire à des altérations structurelles et fonctionnelles, voire à la mort cellulaire. L'étude de

ces mécanismes est fondamentale pour comprendre la toxicité et développer des stratégies de prévention et de traitement

2.3.2. Mécanismes d'action cellulaire des toxines

Les mécanismes d'action cellulaire des toxines correspondent aux altérations fonctionnelles et structurelles qui se produisent au niveau de la cellule suite à l'exposition à une substance toxique. Ces mécanismes impliquent des perturbations de l'homéostasie cellulaire, affectant les organites, les membranes et les processus métaboliques. Ils résultent souvent d'interactions moléculaires initiales qui déclenchent une cascade de réponses cellulaires pouvant conduire à des dysfonctionnements, voire à la mort cellulaire. ^(29;17)

2.3.3. Mécanismes d'action tissulaire des toxines

Les mécanismes d'action tissulaire des toxines correspondent aux effets des substances toxiques à l'échelle des tissus, résultant de l'altération coordonnée des cellules et de leur environnement. Ces mécanismes impliquent des perturbations de l'organisation tissulaire, de la communication intercellulaire et de la fonction physiologique des organes. Ils constituent une étape intermédiaire entre les effets cellulaires et les manifestations cliniques observées à l'échelle de l'organisme. ^(29;17)

3. Interaction entre métabolisme et biotoxicité:

L'interaction entre le métabolisme et la biotoxicité constitue un aspect fondamental en toxicologie, car le métabolisme des xénobiotiques joue un rôle déterminant dans la modulation de leur toxicité. En effet, les substances toxiques subissent des transformations biochimiques au sein de l'organisme, principalement au niveau du foie, ce qui peut conduire soit à leur détoxification, soit à leur bioactivation en métabolites plus toxiques. Ainsi, le métabolisme agit comme un facteur clé influençant la nature, l'intensité et la durée des effets toxiques.

3.1. Métabolisme des xénobiotiques:

Le métabolisme des xénobiotiques a tout d'abord un rôle protecteur vis-à-vis des xénobiotiques et est classiquement décrit en quatre phases, selon les enzymes utilisées. La phase 0 correspond à l'entrée des xénobiotiques dans la cellule, permettant sa prise en charge par divers systèmes enzymatiques. Les enzymes de phase I, ou de fonctionnalisation, permettent une oxydation, réduction ou hydrolyse d'une molécule afin de faciliter l'intervention des enzymes de phase II, ou de conjugaison, permettant de greffer des groupements polaires aux xénobiotiques. Enfin, les enzymes de phase III interviennent dans le transport de ces composés, permettant leur efflux à travers les membranes cellulaires. ⁽⁵⁵⁾

3.2. Bioactivation et augmentation de la toxicité:

La bioactivation est un processus métabolique par lequel une substance initialement peu toxique ou inerte est transformée, au sein de l'organisme, en un ou plusieurs métabolites hautement réactifs et potentiellement plus toxiques. Ce phénomène se produit principalement lors des réactions de phase I du métabolisme, notamment sous l'action des enzymes du cytochrome P450. Ainsi, au lieu de neutraliser la substance, le métabolisme peut

paradoxalement amplifier sa toxicité en générant des intermédiaires électrophiles capables d'interagir avec les constituants cellulaires essentiels.⁽³⁶⁾

3.3. Détoxification:

La détoxification est un processus biologique essentiel par lequel l'organisme transforme et élimine les substances toxiques afin de réduire leur nocivité. Ce mécanisme repose principalement sur des réactions enzymatiques se déroulant au niveau du foie, mais également dans d'autres organes comme les reins, les poumons et l'intestin. Contrairement à la bioactivation, la détoxification vise à convertir les composés lipophiles en métabolites plus hydrosolubles, facilitant ainsi leur excrétion et limitant leur accumulation dans l'organisme.
(17; 36)

3.4. Production de métabolites réactifs:

La production de métabolites réactifs constitue un mécanisme clé de la toxicité des xénobiotiques. Elle résulte principalement des transformations métaboliques, notamment lors des réactions de phase I, où certaines substances sont converties en intermédiaires chimiques instables et hautement réactifs. Ces métabolites, souvent électrophiles ou radicalaires, possèdent une forte affinité pour les macromolécules biologiques, ce qui peut entraîner des altérations structurelles et fonctionnelles importantes au sein des cellules.

En conclusion, l'étude de l'interaction entre le métabolisme et la biotoxicité met en évidence la complexité des relations entre l'organisme et les substances étrangères (xénobiotiques). En effet, le métabolisme ne se limite pas à un rôle de défense visant à détoxifier et à transformer les composés en formes plus facilement éliminables, mais il peut également contribuer à l'augmentation de leur toxicité à travers des processus de bioactivation conduisant à la formation de métabolites hautement réactifs capables d'induire des dommages cellulaires et moléculaires. De plus, la production de métabolites réactifs et le stress oxydatif constituent des éléments clés dans l'explication de nombreux effets toxiques.
(29;17)

Partie
experimental

Chapitre 01 :

Méthodes et matériel

1. Zone d'étude:

1.1. Définition de la zone de Oued Righ:

La région de l'Oued Righ est située dans la wilaya de Touggourt, au sud-est de l'Algérie. Elle s'étend le long d'une dépression naturelle reliant Oued Souf au nord et Oued M'zab au sud. Cette région se caractérise par un relief désertique, un climat aride et la présence de ressources en eaux souterraines qui ont permis le développement d'une agriculture oasienne malgré des conditions environnementales difficiles. Elle se situe entre les latitudes 32° et 34° nord et les longitudes 5° et 7° est, limitée au nord par Biskra et El Oued, au sud par Ouargla, à l'est par la Tunisie et à l'ouest par les Hauts Plateaux et le Sahara.⁽³⁰⁾

La région repose principalement sur les eaux souterraines issues du complexe aquifère profond, qui comprend d'importants réservoirs alimentant les puits et les oasis. Ces ressources ont été exploitées depuis longtemps à travers des puits traditionnels, puis modernisées par l'utilisation de pompes et de techniques d'irrigation telles que le goutte-à-goutte, contribuant ainsi au maintien de l'activité agricole malgré la rareté des précipitations. Sur le plan géologique, l'Oued Righ repose sur une succession de formations riches en eau souterraine, organisées de haut en bas comme suit : le Miopliocène, le Sénonien, le Turonien, l'Albien et le Jurassique, ce qui explique l'abondance des ressources hydriques et leur rôle essentiel dans la durabilité de l'agriculture dans la région⁽²⁷⁾.



Figure23: La figure présente une carte illustrative de l'étendue du Wadi Righ.⁽³⁰⁾

1.2. Caractéristiques et qualité de l'eau dans la région:

Les eaux souterraines chaudes sont généralement alcalines, comme en témoignent leurs valeurs de pH. Les valeurs de pH mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines chaudes prélevés dans Oued Righ varient de 6,76 à 8,70, ce qui est inférieur aux limites fixées par l'Organisation mondiale de la santé (2011, 2017), indiquant ainsi leur potabilité. Cependant, les valeurs de conductivité électrique mesurées sont nettement supérieures à la limite

admissible de 3 940 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les analyses ont montré que la conductivité électrique des eaux souterraines varie de 2 000 à 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la plage la plus fréquente se situant entre 4 000 et 6 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il est à noter que les échantillons d'eaux souterraines prélevés dans la partie sud de la vallée de Rigg présentent des valeurs de conductivité électrique élevées. Ces valeurs élevées indiquent une forte concentration d'ions dans l'eau, résultant d'une salinité élevée. ⁽²⁷⁾

2. Matériels:

2.1 Dispositif de magnétisation:

Dans cette expérience, l'appareil Delta Water a été utilisé pour traiter l'eau et lui redonner ses propriétés actives; un champ magnétique a été appliqué à l'eau pendant 10 minutes.

2.2. Animaux et conception expérimentale:

Vingt-sept souris femelles adultes Wistar White, pesant entre 121 et 190 grammes et âgées de 6 à 8 semaines, ont été achetées et hébergées dans l'animalerie de l'incubateur d'entreprises de l'Université El Oued, à température ambiante contrôlée ($27 \pm 3^\circ\text{C}$) et sous un cycle lumière/obscurité de 12 heures. Les souris ont été réparties aléatoirement en six groupes et placées dans des cages en plastique garnies de copeaux de bois. Elles ont reçu une alimentation standard pour rongeurs (bromée) et 150 ml d'eau à volonté. Les animaux ont été observés pendant environ une semaine avant le début de l'expérience afin de permettre leur acclimatation. Le protocole expérimental a été réalisé conformément aux directives institutionnelles et toutes les procédures de manipulation animale de cette étude ont été approuvées par l'université.

2.4. Plan expérimental:

Cette étude expérimentale a été conçue dans le but d'évaluer l'effet des traitements de l'eau par deux techniques, à savoir la magnétisation et le plasma froid, en tenant compte à la fois de la nature du traitement, de son ordre d'application ainsi que du mode d'utilisation de l'eau chez les modèles animaux. Le dispositif expérimental repose sur six traitements distincts, avec une répartition quasi homogène des animaux afin d'assurer la fiabilité statistique des résultats. Le premier traitement (témoin) comprend trois rats ayant reçu de l'eau non traitée, tandis que le deuxième traitement regroupe cinq rats abreuvés avec de l'eau magnétisée. Le troisième traitement inclut cinq rats ayant reçu de l'eau traitée par plasma froid. Par ailleurs, le quatrième traitement est constitué de cinq rats abreuvés avec de l'eau ayant subi un double traitement, d'abord par magnétisation puis par plasma froid, alors que le cinquième traitement comprend cinq rats ayant reçu de l'eau traitée par plasma froid suivie de la magnétisation, dans le but d'évaluer l'effet de l'ordre des traitements. Enfin, le sixième traitement concerne quatre rats soumis à une application externe par pulvérisation des eaux traitées selon les mêmes modalités, où le premier rat a été pulvérisé avec de l'eau magnétisée, le deuxième avec de l'eau traitée par plasma froid, le troisième avec de l'eau traitée par magnétisation suivie du plasma froid, et le quatrième avec de l'eau traitée par plasma froid suivie de la magnétisation. Ce protocole comparatif permet ainsi d'analyser les effets physico-biologiques du type de traitement, de sa séquence ainsi que du mode d'application sur les organismes vivants.

Groupe A : Trois rats ayant reçu de l'eau non traitée, constituant le groupe témoin.

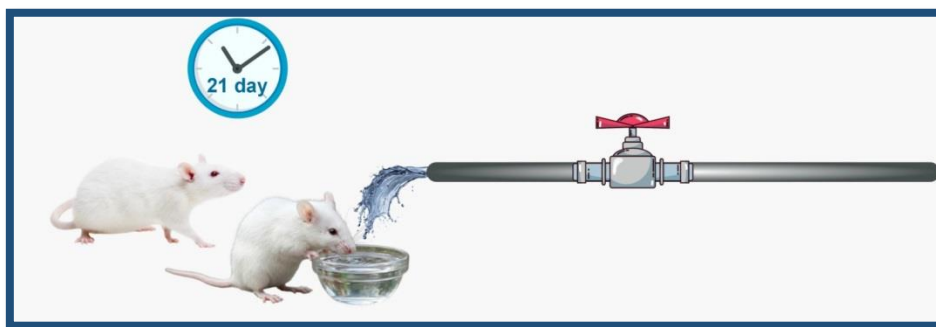


Figure 24: Conception graphique illustrant la conception de l'expérience du groupe de témoins

Groupe B : Cinq rats ayant été abreuvés avec de l'eau soumise à un traitement par magnétisation.

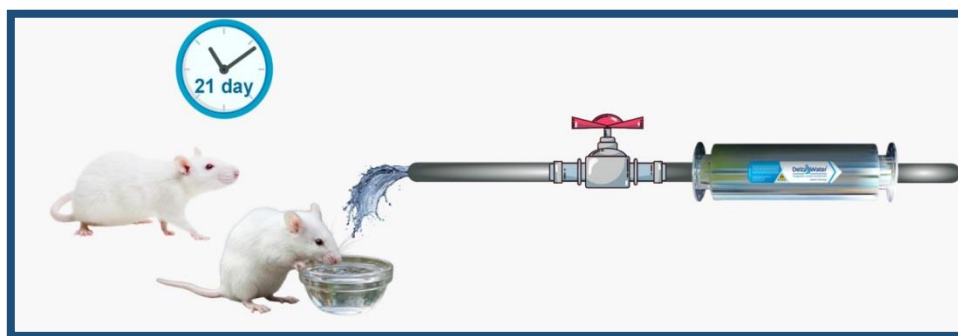


Figure 25: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe de rats ayant reçu de l'eau magnétisée à boire.

Groupe C : Cinq rats ayant reçu de l'eau traitée par plasma froid.

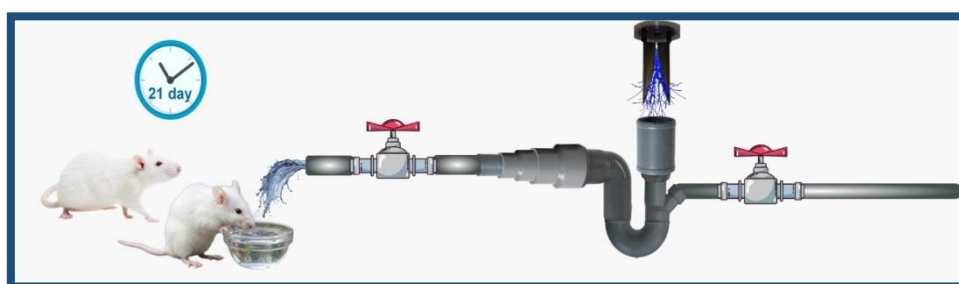


Figure 26: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe des rats ayant reçu de l'eau traitée au plasma froid.

Groupe D : Cinq rats ayant été abreuvés avec de l'eau ayant subi un traitement séquentiel, d'abord par magnétisation puis par plasma froid.

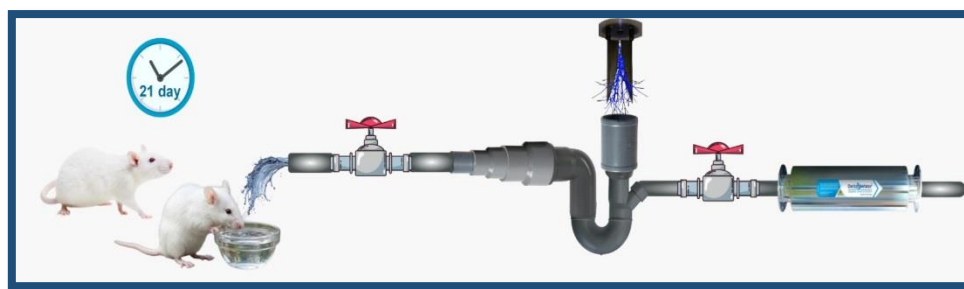


Figure 27: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe des rats ayant reçu de l'eau magnétisée suivie d'un plasma froid.

Groupe E : Cinq rats ayant reçu de l'eau traitée selon une séquence inverse, à savoir plasma froid suivi d'une magnétisation.

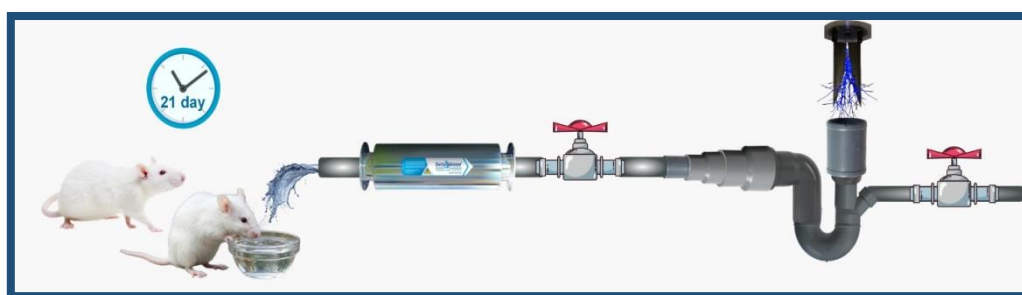


Figure 28: Un schéma illustrant le dispositif expérimental utilisé pour un groupe des rats auxquelles on a administré de l'eau traitée au plasma froid puis magnétisée.

Groupe F : Quatre rats ayant fait l'objet d'une exposition externe par pulvérisation d'eaux traitées. Chaque rat, préalablement identifié par un marquage caudal, a été aspergé selon le protocole suivant :

Rat 1 : Eau traitée par magnétisation.

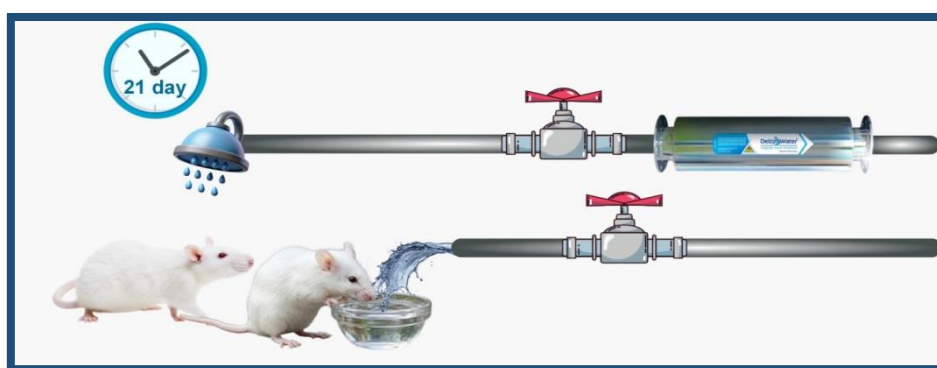


Figure 29: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau magnétisée.

Rat 2 : Eau traitée par plasma froid.

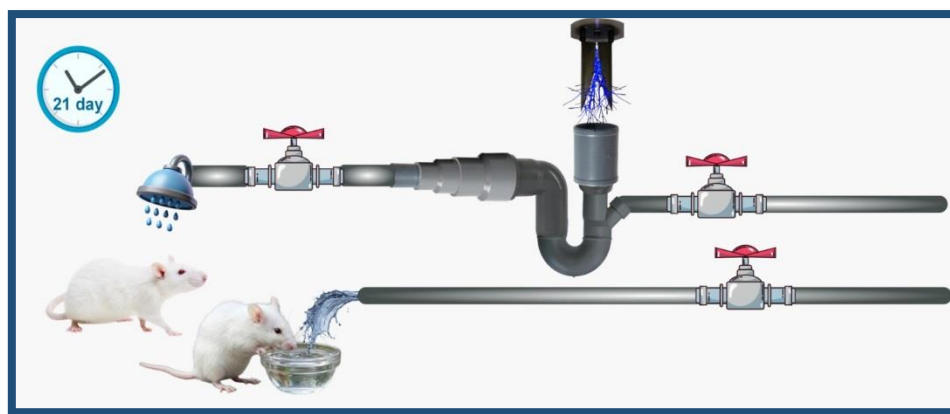


Figure 30: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau traitée au plasma froid.

Rat 3 : Eau soumise à une magnétisation suivie d'un traitement par plasma froid.

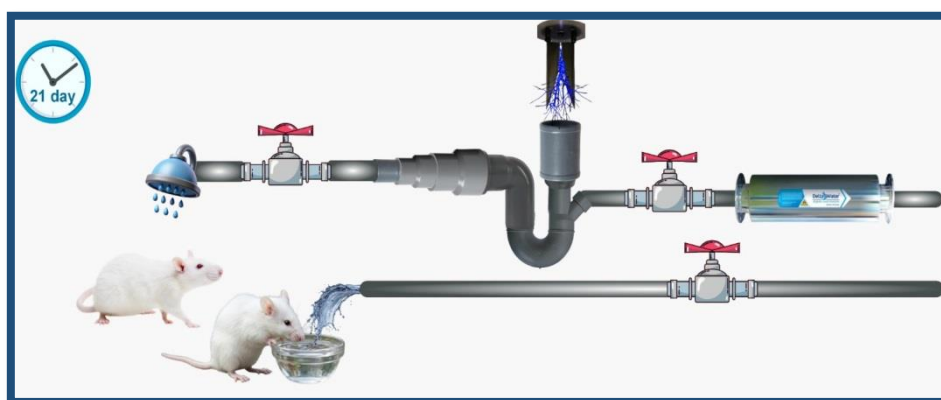


Figure 31: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau magnétisée puis de plasma froid.

Rat 4 : Eau traitée par plasma froid suivie d'une magnétisation.

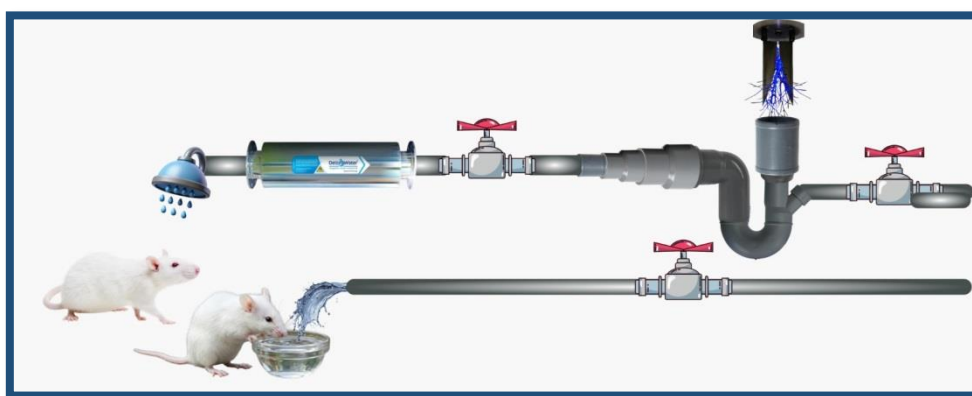


Figure 32: Un schéma illustrant le protocole expérimental d'une rats aspergée d'eau traitée au plasma froid puis magnétisée.

2.5.Procédure expérimentale:

Cette étude a été réalisée selon un protocole expérimental intégré combinant le fonctionnement d'un système physique de traitement de l'eau, la préparation des modèles animaux et leur suivi. Dans une première étape, le dispositif expérimental dédié au traitement de l'eau par magnétisation et plasma froid a été installé dans un système linéaire intégré, comme illustré dans la figure X. L'entrée d'eau a été reliée à une vanne de régulation permettant le contrôle du débit, et intégrée à un réseau de tuyauterie en plastique assurant un écoulement stable et continu. L'eau a ensuite été dirigée vers l'unité de magnétisation, constituée d'un tube cylindrique entouré d'un aimant permanent, permettant l'exposition à un champ magnétique statique. Par la suite, l'eau a été acheminée vers l'unité de plasma froid, où elle traverse une zone de décharge électrique générée entre deux électrodes métalliques reliées à une source haute tension. Un compresseur d'air a été utilisé pour injecter un flux gazeux afin de favoriser la formation d'un plasma à pression atmosphérique, permettant ainsi l'interaction directe de l'eau avec les espèces réactives générées. Le système a été équipé de vannes et de raccords assurant le contrôle du flux et l'étanchéité de l'installation.



Figure 33: La figure illustre le système de connexion expérimental entre le dispositif de magnétisation et le dispositif à plasma froid.

Sur la base de ce dispositif, quatre modalités de traitement de l'eau ont été produites : magnétisation seule, plasma froid seul, traitement séquentiel (magnétisation suivie de plasma froid) et traitement inverse (plasma froid suivi de magnétisation), afin d'évaluer l'effet du type de traitement ainsi que de son ordre d'application.

Dans une étape ultérieure, les animaux expérimentaux ont été préparés selon des conditions standards de laboratoire, incluant une période d'acclimatation dans un environnement contrôlé (température, humidité et cycle lumière/obscurité), avec une alimentation équilibrée. Les animaux ont été répartis aléatoirement dans les différents groupes expérimentaux. Au cours de l'expérience, l'eau a été administrée par abreuvement quotidien, en accès libre (*ad libitum*), selon la nature de chaque groupe. Concernant le groupe soumis à une application externe, un protocole double a été appliqué : les rats ont été abreuvés avec de l'eau non traitée tout en étant exposés à une pulvérisation d'eaux traitées

selon les différents protocoles définis, afin d'isoler l'effet de l'exposition externe de celui de l'ingestion.

L'expérience a été conduite pendant 21 jours consécutifs, au cours desquels l'état général des animaux a été suivi régulièrement, dans le respect des normes éthiques relatives à l'expérimentation animale, permettant ainsi une évaluation fiable des effets biologiques des différents traitements de l'eau.

3.Méthodes:

3.1.Les analyses d'eau:

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur de l'eau ordinaire, de l'eau magnétisée, de l'eau traitée au plasma froid, de l'eau magnétisée suivie d'un traitement au plasma froid et de l'eau traitée au plasma froid suivie d'une magnétisation, au laboratoire de la Compagnie algérienne des eaux, unité d'El Oued.

Nous avons prélevé 0,5 litre d'eau par échantillon et effectué les analyses suivantes :

3.1.1.Détection des polluants :

- **Phosphates PO_4^3** : Nous avons placé 50 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouté 1 ml d'acide ascorbique et 2 ml du mélange réactif. Après 10 minutes, nous avons mesuré l'absorbance à l'aide d'un spectrophotomètre.
- **Nitrites NO_2^-** : Introduire 50 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouter 1 ml de solution acide. Après 20 minutes, mesurer l'absorbance à l'aide d'un spectrophotomètre.
- **Ammonium, NH_4^+** : Introduire 50 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouter 4 ml de réactif 1 et 4 ml de réactif 2. Après 30 minutes, mesurer l'absorbance à l'aide d'un spectrophotomètre.

3.1.2.Dosage du calcium Ca^{2+} :

Introduire 10 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouter 40 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 0,2 mg de HSN et titrer le mélange avec de l'EDTA. Le titrage est terminé lorsque la couleur passe du rose au bleu.

- Pour de l'eau non traitée, utiliser 6,4 ml de titrant.
- Pour de l'eau magnétisée, utiliser 5,1 ml de titrant.
- Pour de l'eau traitée au plasma froid, utiliser 7 ml de titrant.
- Pour de l'eau magnétisée puis traitée au plasma froid, utiliser 7,2 ml de titrant.
- Pour de l'eau traitée au plasma froid puis magnétisée, utiliser 8,9 ml de titrant.

$$Ca^{2+} = \frac{C_{EDTA} \times V_{EDTA}}{V_{\text{échantillon}}}$$

3.1.3. Dosage du TH :

Introduire 10 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouter 40 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 0,2 mg de NET et 4 ml de tampon K 10. Titrer le mélange avec de l'EDTA. Le titrage est terminé lorsque la couleur passe du rose au bleu.

- Pour l'eau non traitée, utiliser 9 ml de titrant.
- Pour l'eau magnétisée, utiliser 7,9 ml de titrant.
- Pour l'eau traitée au plasma froid, utiliser 9,7 ml de titrant.
- Pour l'eau magnétisée puis traitée au plasma froid, utiliser 10 ml de titrant.
- Pour l'eau traitée au plasma froid puis magnétisée, utiliser 11,6 ml de titrant.

$$TH = \frac{C_{EDTA} \times V_{EDTA}}{V_{\text{échantillon}}}$$

3.1.4. Dosage des chlorures Cl^- :

Introduire 5 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouter 45 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 1 ml de chromate de potassium K_2CrO_3 et titrer le mélange avec une solution de nitrate d'argent $AgNO_3$. Le titrage est terminé lorsque la couleur passe du jaune au rouge brique.

- Pour l'eau non traitée 2,9 ml de titrant ont été utilisés.
- Pour l'eau magnétisée 3,1 ml de titrant ont été utilisés.
- Pour l'eau traitée au plasma froid 3,2 ml de titrant ont été utilisés.
- Pour l'eau magnétisée puis traitée au plasma froid 5 ml de titrant ont été utilisés.
- Pour l'eau traitée au plasma froid puis magnétisée 4 ml de titrant ont été utilisés.

$$Cl^- = \frac{(V_{AgNO_3} - V_{Blanc})}{(V_{\text{échantillon}} \times C_{AgNO_3}) \times 35453}$$

3.1.5. Dosage du TAC :

Introduire 100 ml d'eau par échantillon dans un erlenmeyer et ajouter quelques gouttes d'hélianthine. Titrer avec la solution jusqu'à ce que la couleur passe de l'orange à l'orange jaunâtre.

- Pour l'eau non traitée, 16,5 ml de titrant ont été utilisés.
- Pour l'eau magnétisée, 16,9 ml de titrant ont été utilisés.
- Cependant, pour l'eau traitée au plasma froid, l'eau magnétisée puis traitée au plasma froid, et l'eau magnétisée puis traitée au plasma froid, la couleur change juste avant le titrage car l'eau, lors de ces traitements, passe d'un milieu basique à un milieu acide, indiquant la disparition du système carbonate.

$$TAC = (V_{H_2SO_4^{-3}(\text{échantillon})} - V_{Blanc}) \times 10$$

3.1.6. Dosage des nitrates :

Dans un erlenmeyer, introduire 10 ml d'eau par échantillon et ajouter 1 ml de salicylate de sodium. Ajouter ensuite quelques gouttes de solution de NaOH à 30 %. Incuber pendant 2 heures à 80 °C. Après séchage, ajouter 2 ml d'acide citrique et laisser incuber pendant

10 minutes. Enfin, ajouter 15 ml d'eau distillée et 15 ml de solution de tartre double. Mesurer la teneur en nitrates à l'aide d'un spectrophotomètre.

3.1.7. Estimation des résidus secs :

Placer 50 ml d'eau par échantillon dans un bécher en verre, puis sécher à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, peser chaque échantillon avec une balance de précision, en tenant compte du poids du bécher.

3.2. Sacrifice des animaux et prélèvement des organes (foie, cœur, reins, cerveau et peau):

Après 21 jours d'administration d'eau traitée, les rats sont euthanasiés par inhalation de vapeurs de chloroforme. La paroi abdominale est ouverte, le diaphragme est incisé et le cœur, le foie, les reins, la peau et le cerveau sont prélevés. Ces organes sont lavés dans une solution de chlorure de sodium à 0,9 % et conservés dans une solution de formol à 10 % pour examen histologique.



Figure 34: Les images montrent des rats après la sacrifice et le prélèvement de leurs organes.

3.3. Prélèvement sanguin:

Le sang est prélevé à l'abattage dans des tubes héparinés et traités à l'EDTA, ainsi que dans un tube SEQ. Il est centrifugé à 3 300 tr/min pendant 15 minutes et conservé à 4 °C pour analyse biochimique.

3.4. Analyses de sang:

Les paramètres biologiques analysés comprenaient la créatinine sérique, les transaminases (ALAT et ASAT), le cholestérol sérique, la protéine C-réactive (CRP), la glycémie, le LDL-cholestérol, le HDL-cholestérol, les triglycérides et l'urée. De plus, une numération formule sanguine (FNS) a été réalisée, incluant le nombre de globules blancs (GB) et le taux d'hémoglobine (Hb). Toutes ces analyses ont été effectuées dans un laboratoire médico-biologique spécialisé, conformément aux protocoles standard établis.

3.5. Étude histologique :

Des coupes de tissu ont été préparées à partir du foie, des reins et du cœur. Une étude histologique complémentaire a également été réalisée sur d'autres organes susceptibles d'abriter des sources de toxicité : le cerveau et la peau.

3.5.1. Fixation :

La fixation constitue une étape fondamentale en histologie, ayant pour objectif principal la préservation des structures cellulaires et tissulaires ainsi que le durcissement des échantillons afin de faciliter leur manipulation ultérieure. Cette étape doit être réalisée immédiatement après le prélèvement pour éviter toute dégradation autolytique ou altération des constituants biologiques. Elle consiste à immerger rapidement le tissu dans un volume suffisant de liquide fixateur, permettant une pénétration efficace et homogène.

Le fixateur le plus couramment utilisé en photomicroscopie est le formol neutre à 10 % (correspondant à une solution de formaldéhyde à 4 % dans un tampon phosphate salin), reconnu pour sa capacité à préserver l'architecture générale des tissus. Ce procédé assure le maintien de l'intégrité structurale des cellules et des matrices extracellulaires. Toutefois, bien que la fixation permette de stabiliser les protéines, notamment les enzymes, elle peut également entraîner une certaine dénaturation de celles-ci, ce qui peut influencer les résultats de certaines techniques histologiques ou histochimiques. Dans certains cas spécifiques, notamment en microscopie fluorescente, des fixateurs alternatifs tels que le liquide de Bouin peuvent être employés en raison de leurs propriétés particulières.

3.5.2. Déshydratation et inclusion :

La déshydratation et l'inclusion représentent des étapes essentielles du traitement histologique, ayant pour but de retirer l'eau contenue dans les tissus biologiques et de la remplacer par un milieu solide permettant la réalisation de coupes fines. En effet, pour obtenir des sections histologiques d'une épaisseur généralement comprise entre 2 et 5 µm, le tissu doit être soutenu par une matrice rigide assurant sa stabilité lors de la coupe.

Étant donné que la paraffine, milieu d'inclusion le plus fréquemment utilisé en photomicroscopie, est hydrophobe et non miscible avec l'eau, il est indispensable d'éliminer préalablement toute trace d'eau. Cette étape est réalisée progressivement par immersion des échantillons dans une série de bains d'éthanol de concentrations croissantes (60°, 70°, 80°, 90°, puis alcool absolu), afin d'éviter toute altération brutale des structures tissulaires.

Après la déshydratation, les échantillons sont traités avec un agent de clarification hydrophobe, généralement le xylène, qui permet de remplacer l'alcool et de rendre le tissu compatible avec la paraffine. Enfin, l'infiltration est réalisée par immersion dans de la paraffine fondue, qui pénètre les tissus et remplace le xylène. Une fois solidifiée, la paraffine forme un bloc homogène englobant le tissu, prêt à être sectionné en fines coupes pour l'observation microscopique.

3.5.3. L'inclusion:

L'inclusion représente l'étape ultime du protocole de traitement histologique précédant la microtomie. Elle consiste en l'infiltration complète des tissus, préalablement déshydratés et clarifiés, par un agent d'inclusion hydrophobe, généralement la paraffine, dans le but d'assurer leur stabilisation mécanique et la préservation de leur architecture morphologique. Cette étape est essentielle pour conférer au spécimen une rigidité structurale adéquate, indispensable à l'obtention de coupes histologiques fines, régulières et reproductibles.

À l'issue de la phase de clarification par un solvant organique tel que le xylène, les échantillons sont soumis à une série de bains de paraffine fondue thermostatisée (entre 56 et 60 °C). Ce processus permet une diffusion progressive de la paraffine au sein des compartiments tissulaires, aboutissant au remplacement intégral de l'agent de clarification. L'efficacité de cette infiltration dépend notamment de la durée d'exposition, de la température et de la nature du tissu.

Une fois l'imprégnation achevée, les spécimens sont orientés avec précision dans des moules appropriés contenant de la paraffine liquide, en fonction du plan de coupe souhaité, afin d'optimiser l'interprétation histologique ultérieure. Le refroidissement rapide, généralement réalisé sur une surface réfrigérée, induit la solidification de la paraffine et la formation d'un bloc homogène et compact.

Ce bloc de paraffine assure le maintien de l'intégrité architecturale du tissu et permet sa manipulation lors de la microtomie dans des conditions optimales. La qualité de l'inclusion, évaluée notamment par l'absence d'artéfacts (tels que les inclusions gazeuses ou les zones de mauvaise infiltration) ainsi que par la précision de l'orientation, constitue un facteur déterminant de la qualité morphologique des coupes histologiques et, par conséquent, de la fiabilité et de la pertinence de l'analyse microscopique.

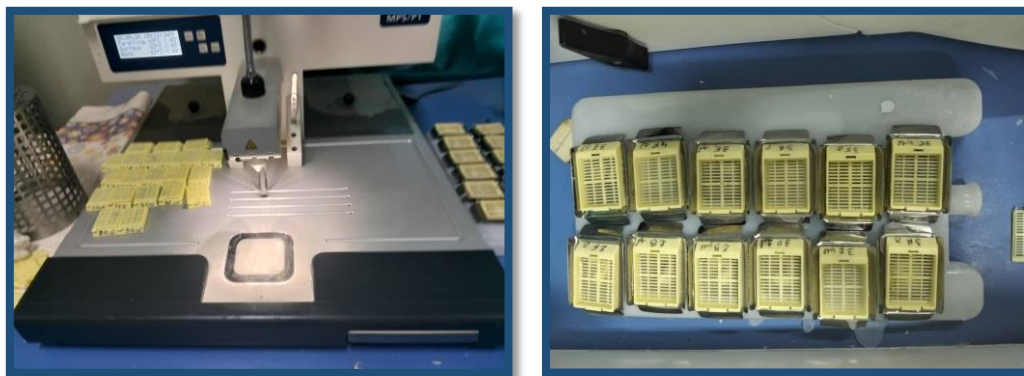


Figure 35: Les éléments sont enrobés d'un matériau hydrophobe, à savoir de la cire de paraffine, puis congelés pour former des morceaux.

3.5.4. Microtomie (coupe histologique) :

La microtomie constitue une étape déterminante du processus histologique, visant à obtenir des coupes tissulaires d'épaisseur micrométrique à partir des blocs de paraffine préalablement inclus. Cette étape est réalisée à l'aide d'un microtome de précision, instrument permettant de produire des sections séries régulières, généralement comprises entre 2 et 5 μm d'épaisseur, adaptées à l'observation en microscopie optique.

Le bloc de paraffine est d'abord fixé sur le porte-échantillon du microtome, puis ajusté de manière à exposer correctement la surface de coupe. La section est effectuée à l'aide d'une lame tranchante (généralement en acier ou en verre), assurant une coupe nette et continue des tissus. Les rubans de sections obtenus sont ensuite recueillis avec précaution et transférés sur

un bain-marie contenant de l'eau tiède, permettant leur étalement et l'élimination des plis éventuels.

Après étalement, les coupes sont récupérées à l'aide de lames porte-objets, sur lesquelles elles adhèrent grâce à un procédé de séchage contrôlé, souvent réalisé en étuve. Cette étape favorise la fixation des sections sur le support et prépare les échantillons pour les étapes ultérieures de déparaffinage et de coloration.

La qualité de la microtomie dépend de plusieurs paramètres, notamment la dureté du bloc, la qualité de l'inclusion, l'angle de coupe, ainsi que l'état de la lame utilisée. Toute imperfection au cours de cette étape (déchirures, plis, compression) peut engendrer des artefacts susceptibles d'altérer l'interprétation histologique.



Figure 36: Image du microtome utilisé pour disséquer les organes en vue d'une étude histologique.

3.5.5. Colorations :

La coloration hématoxyline-éosine (H&E) constitue la technique la plus utilisée en histologie et en histopathologie, en raison de sa simplicité et de sa capacité à mettre en évidence avec précision les structures cellulaires et tissulaires. Son principe repose sur l'affinité différentielle des colorants pour les constituants cellulaires : l'hématoxyline, colorant basique, se fixe sur les acides nucléiques du noyau et les colore en bleu-violet, tandis que l'éosine, colorant acide, teinte les composants cytoplasmiques ainsi que les protéines extracellulaires en rose à différentes intensités. Par ailleurs, en microscopie électronique, des agents de contraste tels que l'acétate d'uranyle et le citrate de plomb sont utilisés afin d'améliorer la visualisation des ultrastructures. La procédure de coloration H&E suit une succession rigoureuse d'étapes permettant d'obtenir une coloration optimale et reproductible. Elle débute par le déparaffinage des lames à travers trois bains successifs de xylène, chacun d'une durée de cinq minutes, afin d'éliminer complètement la paraffine et de rendre le tissu accessible aux solutions aqueuses. Ensuite, les lames subissent une réhydratation progressive par passage dans une série de bains d'éthanol absolu (trois bains de cinq minutes), suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

Une fois la réhydratation effectuée, les lames sont immergées dans une solution d'hématoxyline pendant environ huit minutes, permettant la coloration des noyaux. Après rinçage à l'eau distillée, une différenciation est réalisée à l'aide d'un alcool acide (ou alcool absolu additionné de quelques gouttes d'acide chlorhydrique HCl) pendant trois minutes, afin d'éliminer l'excès de colorant et d'améliorer le contraste nucléaire, suivie d'un nouveau rinçage.

Par la suite, les noyaux sont stabilisés et "bleuis" par immersion rapide dans une solution ammoniacale diluée (eau distillée additionnée de quelques gouttes d'ammoniaque) pendant environ 15 secondes, puis les lames sont de nouveau rincées. Elles sont ensuite contre-colorées à l'éosine, suivie d'un lavage destiné à éliminer l'excès de colorant.

Enfin, les lames passent par une phase de déshydratation progressive à travers deux bains d'éthanol (deux fois cinq minutes), puis une clarification dans deux bains de xylène (deux fois cinq minutes). Cette dernière étape rend le tissu transparent et permet la préparation au montage final.

Les coupes histologiques colorées sont montées entre lame et lamelle à l'aide d'un milieu de montage résineux synthétique dont l'indice de réfraction est proche de celui du verre. Cette étape permet d'assurer la conservation durable des préparations ainsi qu'une meilleure qualité optique lors de l'observation microscopique.



Figure 37: L'image illustre les cuves utilisées dans le processus de teinture, qui commence par l'épilation et se termine par la teinture du tissu.

3.5.6.Observation et lecture microscopique :

L'observation est réalisée à l'aide d'un microscope optique (ou photonique) utilisant la lumière visible. Les lames montées sont examinées afin d'évaluer l'organisation normale des tissus ou de détecter d'éventuelles anomalies cellulaires et tissulaires. La coloration H&E reste la méthode de référence en histologie, car elle permet un excellent contraste entre le noyau, coloré en violet, et le cytoplasme, coloré en rose, facilitant ainsi l'analyse morphologique des structures biologiques.

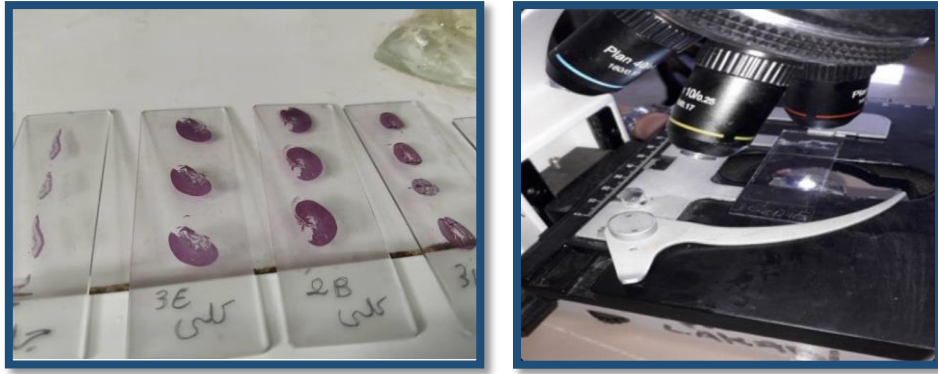


Figure 38: L'image illustre les cuves utilisées dans le processus de teinture, qui commence par l'épilation et se termine par la teinture du tissu.

3.6. Estimation des éléments minéraux:

La teneur en minéraux des organes a été déterminée selon la méthode de l'AOAC (1984) en suivant les étapes suivantes :

- Peser 1 gramme de chaque organe (foie, rein, cœur) et placer chaque échantillon dans un creuset, puis calciner à 450 °C pendant 5 heures.
- Retirer le creuset et le laisser refroidir.
- Transférer les cendres dans un bécher de 100 ml et ajouter 5 ml d'acide chlorhydrique (HCl 2N). Couvrir le bécher.
- Évaporer les extraits en les chauffant au bain-marie à 50 °C pendant 10 minutes. Laisser refroidir la solution et ajouter 25 ml d'eau distillée à chaque solution. Filtrer ensuite la solution dans un flacon de 50 ml. Compléter à volume avec de l'eau distillée.

4. Résultats:

4.1. Evolution pondérale:

D'après les résultats obtenus, une augmentation significative du poids corporel a été observée chez les souris expérimentales par rapport aux souris témoins.

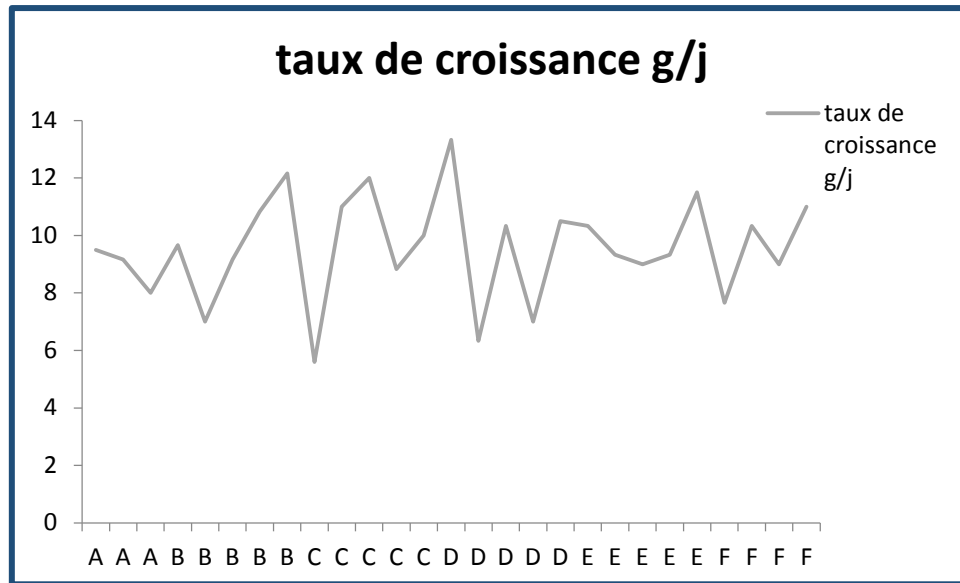


Figure 39: La figure représente le taux de croissance des souris expérimentales au cours des 21 jours de l'expérience.

4.2. Résultats de l'analyse de l'eau:

Les graphiques à barres présentent les analyses physiques et chimiques d'échantillons d'eau avant et après l'application de différents traitements (magnétisation, plasma froid et une combinaison des deux), mettant en évidence l'effet de chaque technique sur les propriétés de l'eau à travers une gamme d'indicateurs physiques et chimiques.

4.2.1. Analyses physiques:

4.2.1.1. pH:

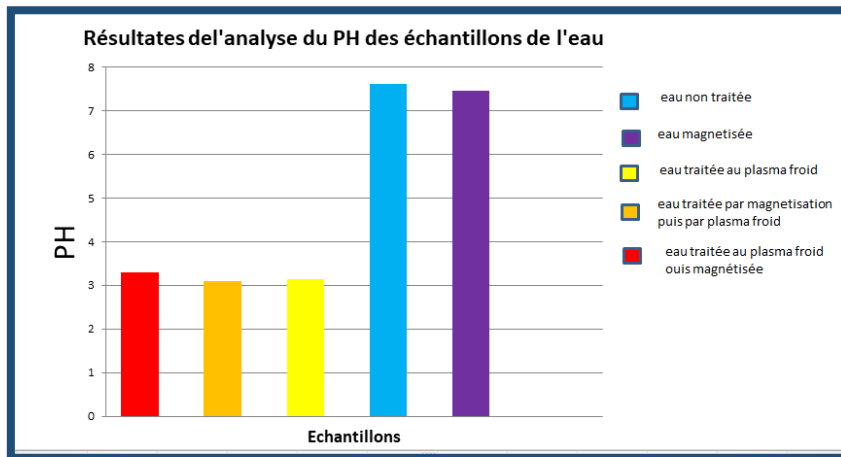


Figure 40: Les résultats de l'analyse du pH mettent en évidence une variation claire en fonction du type de traitement appliqué.

4.2.1.2. conductivité:

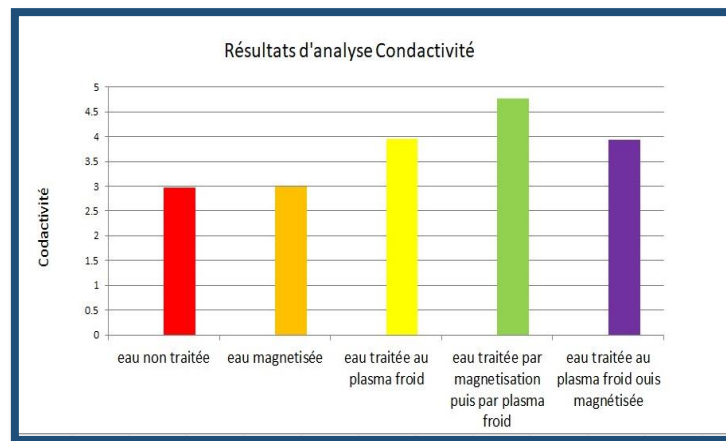


Figure 41: Les résultats de l'analyse de conductivité montrent une nette différence selon le type de traitement appliqué.

4.2.1.3. Turbidité:

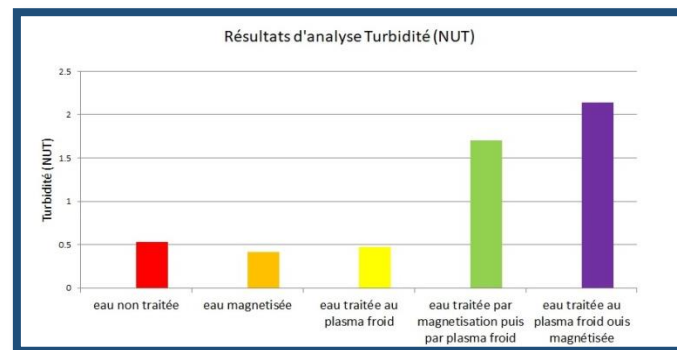


Figure 42: Les résultats de l'analyse de turbidité montrent une nette différence selon le type de traitement appliqué.

4.2.2. Analyses chimiques:

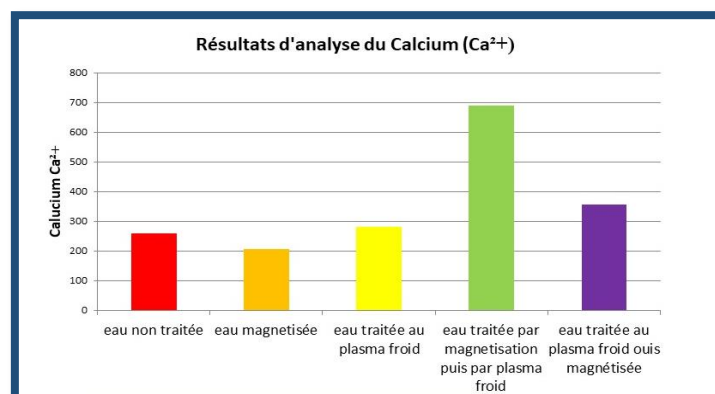
4.2.2.1. le calcium (Ca^{2+}):

Figure 43: Les résultats de l'analyse de calcium (Ca^{2+}) montrent une nette différence selon le type de traitement appliqué.

4.2.2.2. la dureté totale (TH):

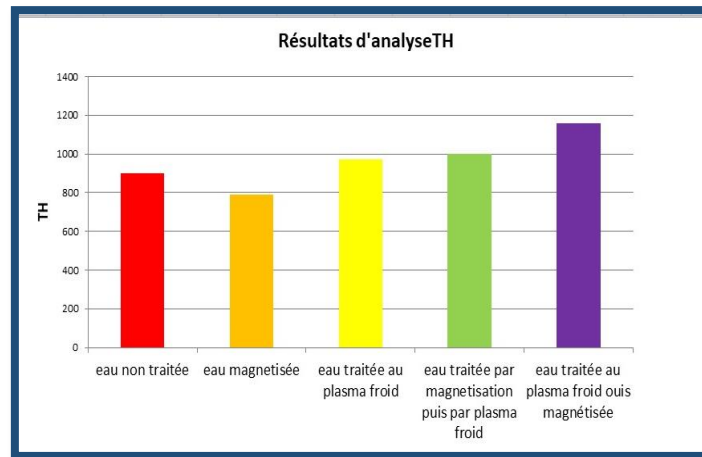


Figure 44: Cette figure illustre l'évolution de la dureté totale (TH) de l'eau après différents traitements.

4.2.2.3. les chlorures (Cl^-):

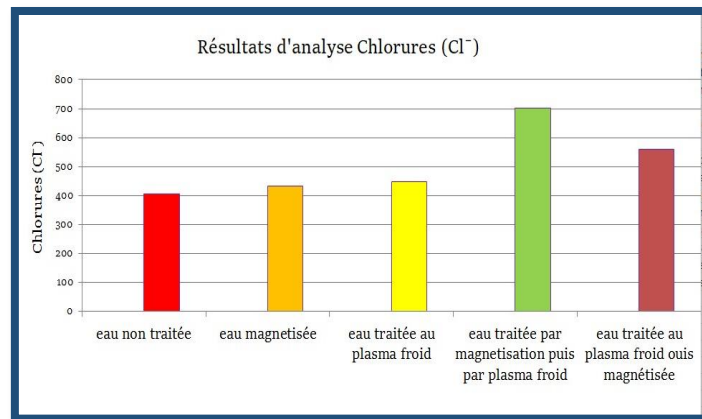


Figure 45: Cette figure illustre l'influence de différentes propriétés sur la concentration en ions chlorure (Cl^-) dans l'eau.

4.2.2.4. l'alcalinité (TAC):

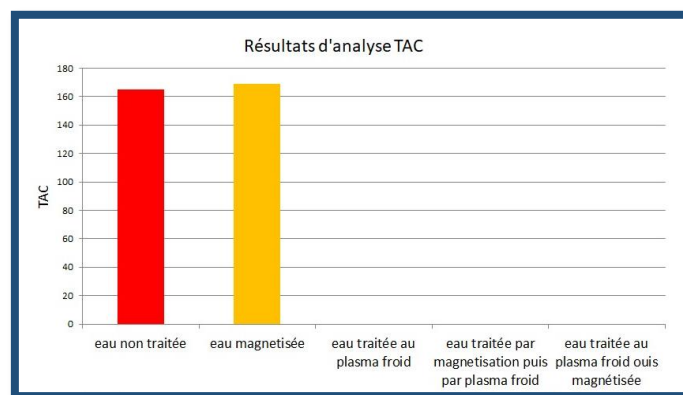


Figure 46: Cette figure illustre les résultats des mesures d'alcalinité totale (TAC) d'échantillons d'eau avant et après traitement.

4.2.2.5. les carbonates et bicarbonates:

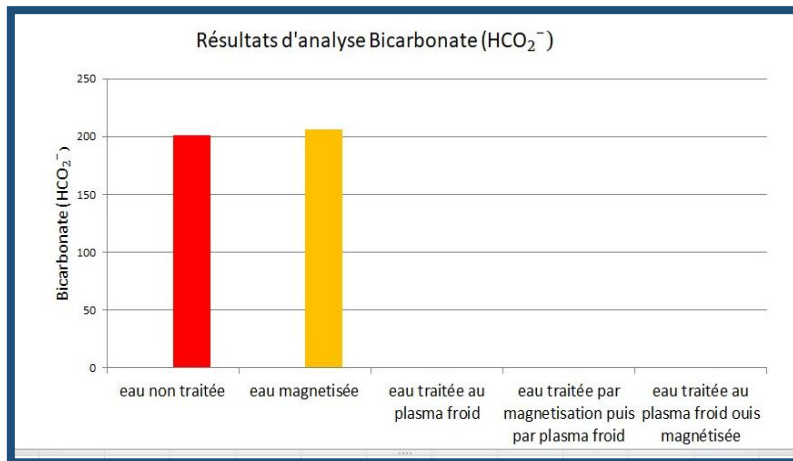


Figure 47: Cette figure illustre l'évolution de la concentration en ions bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau après traitement magnétique, par rapport à l'échantillon témoin.

4.2.2.6. les composés azotés:

4.2.2.6.1. Les nitrates (NO_3^-):

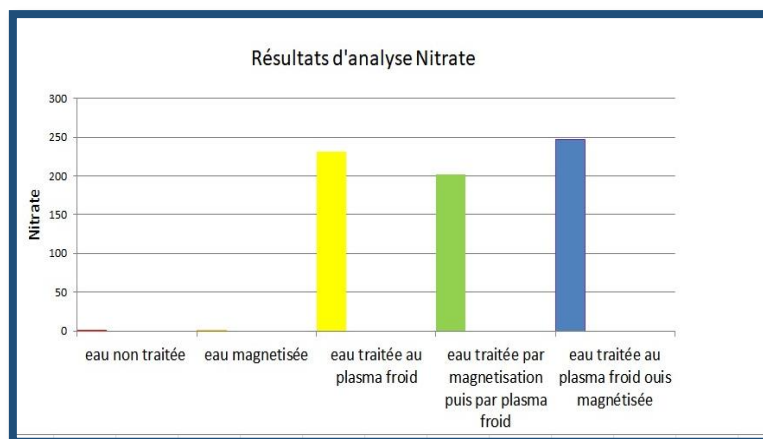


Figure 48: Cette figure illustre l'effet de différents traitements sur la concentration en ions nitrate (NO_3^-) dans l'eau.

4.2.2.6.2. Les nitrites (NO_2^-):

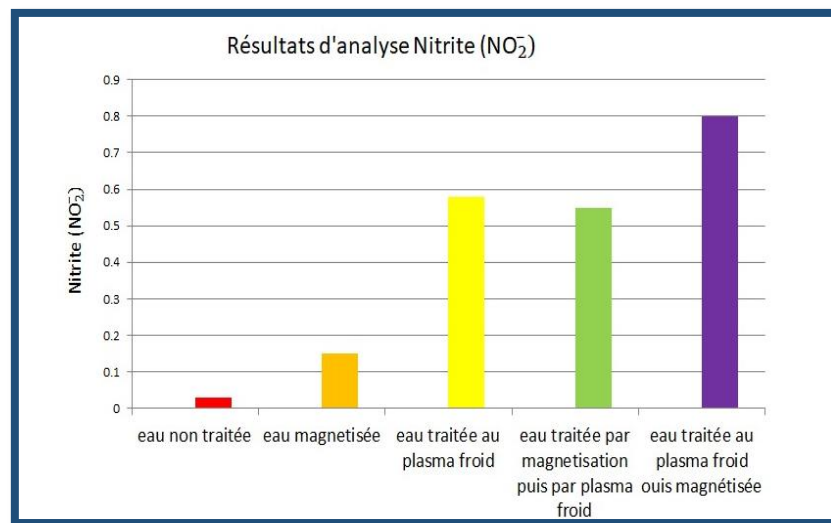


Figure 49: Cette figure illustre l'effet de différents traitements sur la concentration en ions nitrite (NO_2^-) dans l'eau.

4.2.2.6.3. L'ammonium (NH_4^+):

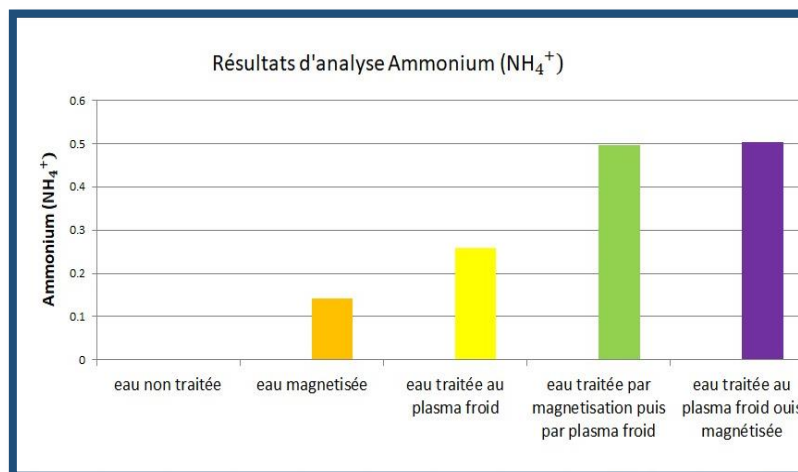


Figure 50: Cette figure illustre l'évolution de la concentration en ions ammonium (NH_4^+) dans l'eau après différents traitements.

4.2.2.7. Les phosphates (PO_4^{3-}):

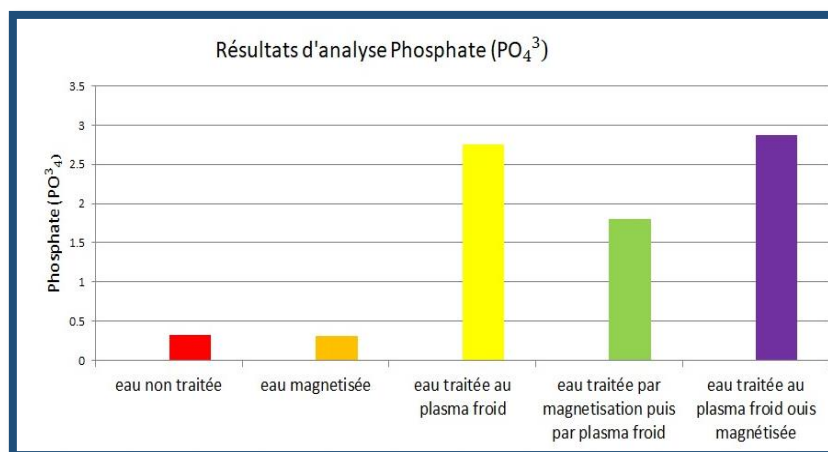


Figure 51: Cette figure illustre l'effet de différents traitements sur la concentration en ions phosphate (PO_4^{3-}).

4.2.2.8. Restes secs:

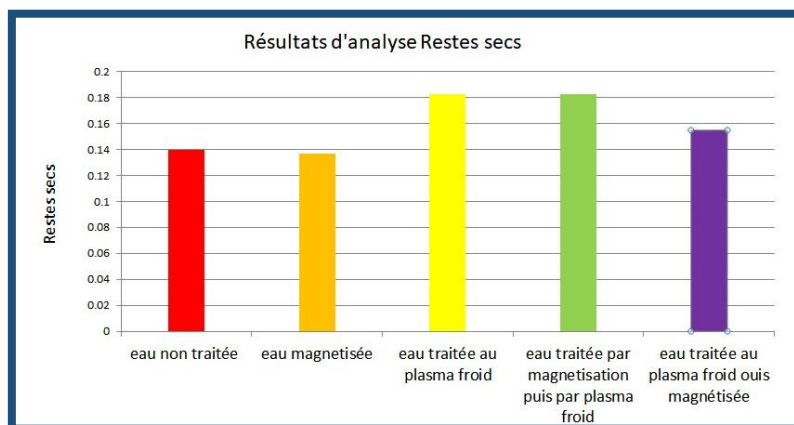


Figure 52: Cette figure illustre les valeurs de résidu sec dans les échantillons étudiés après différents traitements.

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent une nette variation des propriétés physico-chimiques de l'eau en fonction du type de traitement appliqué. Ils reflètent également l'influence de la nature de l'eau brute (eau non traitée) sur l'efficacité de ces techniques, ce qui concorde partiellement avec les données de la littérature scientifique, tout en s'en distinguant par ailleurs.

Concernant l'eau non traitée, nous observons qu'elle se caractérise par des valeurs relativement élevées de dureté totale (TH), de chlorures et de bicarbonates, indiquant sa richesse en sels minéraux. Ceci s'explique par son origine géologique (eau souterraine). Ces résultats sont cohérents avec les observations de Stumm et Morgan (1996), qui ont montré que les eaux souterraines sont souvent riches en calcium et en bicarbonates du fait de leur interaction avec les roches carbonatées. Par conséquent, cette composition initiale joue un rôle fondamental dans la détermination de la réponse de l'eau aux différents traitements.

Quant à l'eau magnétisée, les résultats n'ont montré que des variations mineures par rapport à l'eau brute, notamment au niveau du pH et de la conductivité, avec une diminution significative de la turbidité et de la dureté totale. Cela suggère que l'effet de la magnétisation reste relativement limité, mais qu'il peut contribuer à la réorganisation de la structure physique des sels et réduire leur précipitation. Ceci concorde avec l'étude de Coey et Cass (2000), qui a montré qu'un champ magnétique influence le comportement des cristaux minéraux sans altérer significativement leur composition chimique globale.

Cependant, d'autres études ont mis en évidence des effets plus importants de la magnétisation, ce qui peut s'expliquer par des variations dans la qualité de l'eau étudiée (concentration en sel, pH et présence d'ions spécifiques). Ceci démontre que l'efficacité de cette technique dépend fortement des propriétés initiales de l'eau.

Pour le traitement au plasma froid, les résultats ont montré des changements importants, notamment une diminution du pH, une augmentation de la conductivité et une augmentation des concentrations de nitrates et de nitrites. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de Brisset et Hnatiuc (2012) et de Machala et al. (2012), qui ont attribué ces changements à la formation d'espèces réactives (ERO et ERN). Cependant, les valeurs exceptionnellement élevées de nitrates observées dans cette étude dépassent celles enregistrées dans certaines études antérieures. Ceci s'explique par la forte concentration en sels et en matières premières de l'eau non traitée, qui constitue un milieu riche pour les réactions chimiques et favorise la formation de nitrates.

Concernant les traitements combinés (magnétisation + plasma ou inversement), les résultats ont parfois présenté un comportement non linéaire, avec des augmentations plus importantes de certains paramètres (tels que la conductivité, la turbidité, la dureté et les nitrates) par rapport aux traitements individuels. Ceci suggère un effet synergique entre les deux méthodes, mais peut également entraîner des effets indésirables dans certains cas, comme une augmentation de la turbidité ou des concentrations de certains ions.

Locke et al. (2011) ont indiqué que la combinaison de techniques d'oxydation avancées avec d'autres agents physiques peut amplifier les réactions, mais le contrôle des résultats reste complexe et dépend des conditions expérimentales.

Par ailleurs, la disparition de l'alcalinité (TAC), des carbonates et des bicarbonates après traitement plasma concorde avec l'explication théorique liée à la réduction du pH. Cependant, la rapidité et l'intensité de cette disparition observées dans cette étude pourraient être liées à leur concentration déjà élevée dans l'eau brute, les rendant plus susceptibles d'être rapidement consommées lors des réactions.

De manière générale, les différences entre les résultats de cette étude et ceux de certaines études antérieures peuvent être attribuées principalement à :

La nature de l'eau utilisée (eaux souterraines riches en sel contre eaux de surface ou distillées dans d'autres études) ; la variation de l'intensité et des conditions de traitement (durée d'exposition, type de plasma, intensité du champ magnétique) ; et la composition chimique initiale, qui détermine les types de réactions susceptibles de se produire.

Cette étude confirme que l'efficacité des techniques de traitement, qu'il s'agisse de magnétisation, de plasma ou d'une combinaison des deux, ne peut être généralisée de manière absolue et dépend fortement de la qualité initiale de l'eau. Les eaux riches en sel, comme dans ce cas, présentent une réponse différente et plus complexe que celle rapportée dans certaines études, soulignant l'importance de prendre en compte les propriétés initiales de l'eau lors de l'évaluation ou de la comparaison des résultats de traitement.

4.3. Résultats des analyses de sang:

4.3.1. Dosage de HB:

Cette figure illustre les variations de la concentration d'hémoglobine (Hb g/L) entre les groupes expérimentaux A à F, analysées par le test de Tukey au seuil de signification de 0,05. Tous les groupes sont désignés par la même lettre (a), ce qui indique l'absence de différence statistiquement significative entre les traitements, malgré de légères variations numériques des valeurs. Ceci suggère que les variations observées restent dans les limites des fluctuations normales et ne reflètent pas un véritable effet des différents traitements sur l'hémoglobine.

Le groupe A (eau pure) a présenté une valeur d'hémoglobine normale, servant ainsi de groupe de référence. Le groupe B (eau magnétisée) a montré une légère augmentation de la valeur d'Hb par rapport au groupe de référence, mais cette augmentation n'était pas statistiquement significative, indiquant que l'effet de la magnétisation sur la production d'hémoglobine ou la formation des globules rouges demeure limité ou indirect.

Le groupe C (eau traitée au plasma) a présenté une diminution relative de l'hémoglobine, mais cette diminution n'était pas non plus statistiquement significative. Ceci peut s'expliquer par un léger effet du stress oxydatif résultant des espèces réactives générées dans le plasma. Cependant, cet effet n'a pas induit de modification biologique significative du taux d'hémoglobine. En revanche, le groupe D (magnétisation suivie d'un traitement au plasma) a enregistré la valeur approximative la plus élevée, ce qui pourrait refléter une légère amélioration de l'utilisation de certains minéraux, comme le fer. Toutefois, l'absence de signification statistique confirme que cet effet est insuffisant et non constant.

Pour le groupe E (plasma suivi d'une magnétisation), la valeur moyenne était proche de celle des autres groupes, indiquant que la séquence de traitement (plasma suivi d'une magnétisation) n'a pas d'effet significatif sur l'hémoglobine. Le groupe F (eau claire aspergée d'eau traitée) a enregistré la valeur la plus basse, mais elle est restée dans la même plage statistique, indiquant que la méthode d'exposition indirecte (pulvérisation) a un faible effet sur les composants sanguins.

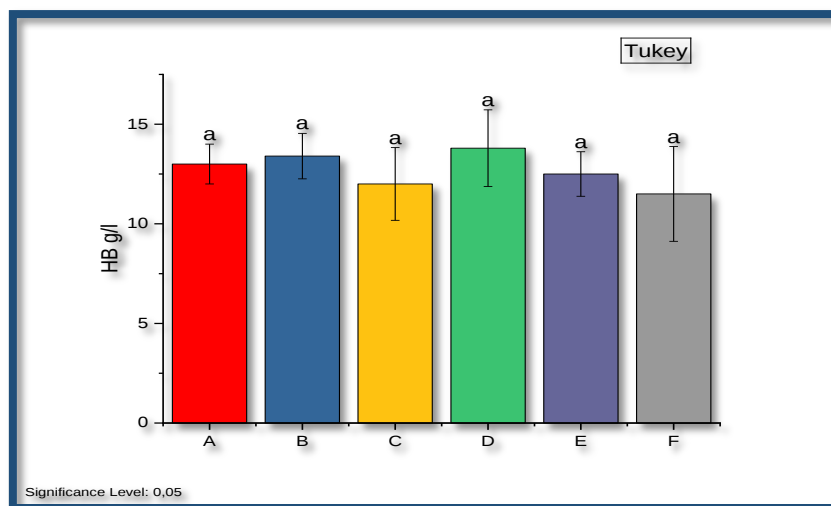


Figure 53 : Taux d'hémoglobine chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Cette figure illustre les variations de la concentration d'hémoglobine (Hb g/L) entre les groupes expérimentaux A à F, à l'aide du test de Tukey (seuil de signification : 0,05). Toutes les barres sont marquées de la lettre (a), indiquant l'absence de différence statistiquement significative entre les groupes. Ceci suggère que les variations observées restent dans les limites de la normale et que les différents traitements de l'eau n'affectent pas significativement la concentration d'hémoglobine.

Pour l'eau ordinaire, une valeur d'hémoglobine normale a été enregistrée, conforme aux valeurs physiologiques de référence. *Guyton et Hall 2016* indiquent que la concentration dans des conditions normales ne reflète que des effets à long terme variables, tels qu'une carence en fer ou d'autres conditions nécessaires. Dans le groupe B (eau magnétisée), une légère augmentation du taux d'Hb a été observée, mais elle n'était pas statistiquement significative. Ce résultat est cohérent avec les conclusions *d'Amiri et Dadkhah 2006*, qui suggèrent que l'effet de l'eau magnétisée sur les biomarqueurs est limité et qu'elle peut améliorer certaines propriétés hydrofuges sans avoir d'effet direct et important sur les taux d'hémoglobine.

Concernant le groupe C (Plasma Froid) : l'eau est éliminée de la solution. Ceci peut s'expliquer par l'effet des espèces réactives (ROS et RNS) provenant du plasma, qui peuvent exercer un léger effet oxydant, comme l'ont démontré *Brisset et Hnatiuc 2012*. Cependant, cet effet est insuffisant pour induire des changements significatifs dans la production d'hémoglobine, notamment au niveau des liaisons à court terme.

Le groupe D (Magnétisation suivie de Plasma) a enregistré la valeur approximative d'hémoglobine la plus élevée, ce qui pourrait refléter un effet légèrement nouveau. La magnétisation peut améliorer la solubilité de certains métaux, comme le fer, contribuant potentiellement à la production finale d'hémoglobine. Ce phénomène a également été observé par *Coey et Cass 2000* dans leur étude de l'influence magnétique sur les propriétés ioniques des solutions. Toutefois, l'absence de signification statistique confirme que cet effet reste limité.

Dans le groupe E (Plasma suivi de magnétisation), les valeurs moyennes étaient similaires à celles des autres groupes, indiquant que l'ordre du traitement central n'affecte pas significativement les taux d'hémoglobine. Ces résultats concordent avec ceux de *Pavlovich et al.2014*, qui se sont concentrés sur les processus superficiels et taxiergiques plutôt que sur des processus rigides comme la production de globules rouges. Le groupe F (eau pure puis pulvérisation d'eau) a été exposé à une irradiation indirecte de l'élément faiblement sensible, confirmant ainsi l'affirmation de *Sharma et al.2009* selon laquelle la gravité de l'infection dépend de la méthode et de la durée d'exposition.

Globalement, ces résultats confirment que les taux d'hémoglobine restent relativement stables et ne sont que brièvement affectés par la qualité de l'eau ou les méthodes de restriction pendant l'expérience. Ceci est cohérent avec les bases physiologiques des variations des taux d'hémoglobine, qui sont liées à des effets à long terme plutôt qu'à des changements bénéfiques à long terme. Vous reliez ces résultats aux résultats précédents concernant les globules blancs (GB), qui incluent les composantes fondamentales du traitement immunitaire et de la réponse des globules rouges, et qui soutiennent l'hypothèse selon laquelle certains éléments spécifiques bénéficient partiellement de certaines fonctions vitales, mais pas d'autres.

4.3.2.Dosage du GB:

La figure illustre l'évolution du nombre de globules blancs (GB g/L) entre les groupes A et F, analysée par le test de Tukey au seuil de signification de 0,05. Les différentes lettres au-dessus des barres (a, b, c, bc) indiquent des différences statistiquement significatives entre les groupes. Le groupe E présente la valeur la plus élevée et se situe dans le sous-groupe (a), suivi des groupes B et D dans le sous-groupe (b). Les groupes A et C présentent les valeurs les plus basses dans le sous-groupe (c), tandis que le groupe F se situe en position intermédiaire (bc), c'est-à-dire qu'il ne diffère pas significativement des valeurs les plus élevées ni des plus basses. Ceci reflète un ordre croissant des valeurs : $A \approx C < B \approx D < E$, le groupe F se situant à un niveau intermédiaire.

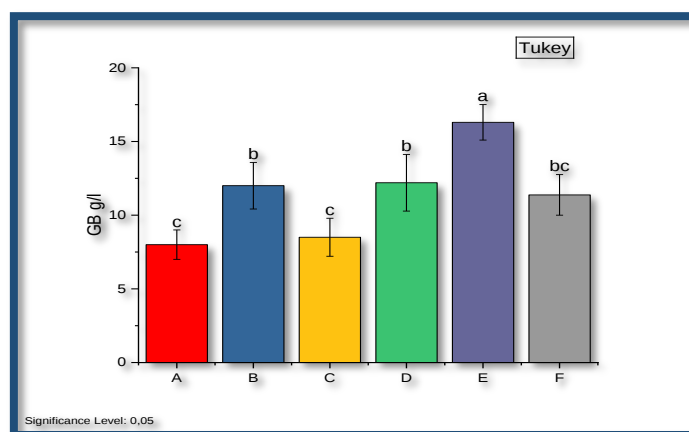


Figure 54: Taux de globules blancs chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Ces résultats s'expliquent par le fait que les globules blancs constituent la première ligne de défense de l'organisme et que toute augmentation de leur nombre reflète l'activation du système immunitaire suite à l'exposition à des facteurs stimulants ou à des stress environnementaux. Dans le groupe A (eau pure), la diminution relative du nombre de globules blancs (GB) reflète l'état basal normal en l'absence de toute stimulation externe, ce qui concorde avec les résultats de *Guyton et Hall 2016* montrant que le nombre de globules blancs reste stable en l'absence de stimuli externes.

Dans le groupe B (eau magnétisée), l'augmentation significative peut être attribuée à l'effet du champ magnétique sur les propriétés de l'eau, notamment la réduction de l'agrégation moléculaire et l'amélioration de la solubilité des sels et des minéraux, ce qui peut faciliter l'absorption d'éléments essentiels au fonctionnement des cellules immunitaires. *Amiri et Dadkhah 2006* ont indiqué que l'eau magnétisée peut avoir un effet positif sur certains biomarqueurs en améliorant l'équilibre ionique et l'activité cellulaire, ce qui peut se traduire par une légère augmentation du nombre de globules blancs.

Dans le groupe C (plasma seul), l'absence de différence significative malgré la présence de composés réactifs (ROS et ARN) peut s'expliquer par une concentration insuffisante de ces espèces ou une durée d'exposition trop courte pour induire une forte réponse immunitaire. *Brisset et Hnatiuc 2012* ont démontré que l'effet du plasma est fortement dépendant de la dose et de l'intensité, et qu'il peut être limité, voire équilibré (entre stimulation et inhibition), dans certains cas.

Dans le groupe D (magnétisation suivie de plasma), une augmentation significative a été observée, indiquant un effet synergique. La magnétisation peut modifier la structure de l'eau et accroître sa disponibilité chimique, permettant ainsi au plasma de produire ultérieurement des espèces réactives plus puissantes. Cette réaction combinée pourrait induire une stimulation plus forte des cellules immunitaires, ce qui concorde avec les résultats de *Locke et al. 2011* concernant l'amplification des réactions chimiques par la combinaison de différentes techniques.

Le groupe E (plasma suivi de magnétisation), qui a enregistré la valeur la plus élevée, est le plus intéressant. Ceci s'explique par le fait que le traitement par plasma induit initialement la production d'une grande quantité d'espèces réactives (ROS et ARN), connues pour activer les voies inflammatoires et immunitaires. La magnétisation affecte ensuite la stabilité, la mobilité et la distribution de ces espèces, augmentant potentiellement leur durée de vie ou leur activité dans l'environnement. *Pavlovich et al. 2014* ont suggéré que le plasma froid peut stimuler les réponses immunitaires en générant un stress oxydatif contrôlé, ce qui explique l'augmentation significative du nombre de leucocytes dans ce groupe.

Pour le groupe F (pulvérisation d'eau traitée), la position intermédiaire (bc) indique la présence d'un effet, mais moins prononcé qu'après ingestion directe. Ceci est attribué au fait que l'exposition externe réduit la concentration des substances actives pénétrant dans l'organisme, et que l'absorption cutanée ou par voies indirectes est limitée. Cela concorde avec les résultats de *Sharma et al. 2009* qui affirment que la réponse biologique est fortement dose-dépendante et dépend de la voie d'administration. De manière générale, on peut

conclure que le traitement combiné, notamment lorsqu'il débute par un traitement au plasma suivi d'une magnétisation, procure l'effet immunostimulant le plus marqué. Cet effet est en revanche plus faible lorsque chaque technique est utilisée individuellement ou par exposition indirecte. Ces résultats confirment également que les globules blancs sont plus sensibles aux variations environnementales que les autres composants sanguins, ce qui en fait un bon indicateur pour évaluer les effets biologiques des traitements physico-chimiques de l'eau.

4.3.3. Dosage du plaquette:

Les taux de plaquettes ont révélé des différences entre les groupes, la valeur la plus élevée étant enregistrée dans le groupe E (environ 350 g/L), suivie du groupe D (environ 280 g/L). Les groupes A, B et F ont présenté des valeurs similaires (environ 250–260 g/L), tandis que la valeur la plus basse a été observée dans le groupe C (environ 220 g/L). Selon le test de Tukey, le groupe E a été classé dans la catégorie (a), le groupe D dans la catégorie (ab), et les groupes A, B, C et F dans la catégorie (b), ce qui indique l'absence de différences statistiquement significatives entre eux.

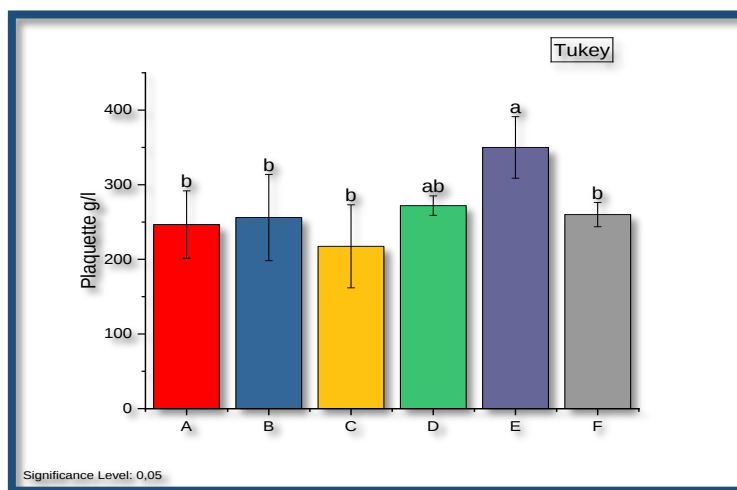


Figure 55: Taux de plaquette chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

L'analyse plaquettaire a révélé une numération plaquettaire élevée dans les groupes D et E, en particulier dans le groupe E, tandis que les valeurs restaient inférieures dans les groupes B et C, et proches de la normale dans les groupes A et F. Ceci suggère une influence possible de la physiothérapie aquatique sur les réponses hématologiques et inflammatoires de l'organisme. Dans le groupe A (témoin), les valeurs plaquettaires étaient normales, reflétant une homéostasie hématologique stable et une fonction physiologique normale. Le groupe B (magnétisé) n'a montré qu'une légère variation, indiquant que l'effet de la magnétisation sur le système hématologique demeure limité. Le groupe C (plasma) a présenté une augmentation modérée, qui peut s'expliquer par la présence d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) produites dans le plasma. Ces ERO peuvent induire de légères réponses inflammatoires ou activer des voies cellulaires associées à la formation des plaquettes, ce qui concorde avec les résultats de Sies H. (2017) concernant le rôle du stress oxydatif dans la modulation des réponses cellulaires.

Le groupe D a présenté une augmentation plus importante, suggérant un effet cumulatif de la combinaison des deux traitements, tandis que le groupe E a enregistré les valeurs les plus élevées, reflétant un fort effet synergique qui pourrait être lié à l'activation de la réponse inflammatoire ou à la stimulation de la production plaquettaire suite à des modifications du milieu intérieur. Ceci est corroboré par Semple J. W. et al. (2011), qui ont confirmé le rôle important des plaquettes dans la réponse inflammatoire et pas seulement dans la coagulation.

Dans le groupe F, les valeurs sont restées stables, indiquant que l'exposition indirecte ne produit pas d'effet hématologique net. Ceci confirme que la réponse physiologique dépend de l'intensité et du type d'exposition.

4.3.4. Dosage du créat:

Les mesures de créatinine ont révélé une nette différence entre les groupes expérimentaux, les valeurs les plus élevées étant enregistrées dans le groupe E (environ 22–23 mg/L), suivi du groupe D (environ 16–17 mg/L). Les groupes B et C ont enregistré des valeurs intermédiaires et similaires (environ 11–13 mg/L), tandis que les valeurs les plus basses ont été observées dans les groupes A et F (environ 7–8 mg/L). Le test de Tukey a montré des différences significatives entre les groupes, le groupe E présentant la valeur la plus élevée (a), suivi du groupe D (b), puis du groupe B (c) et du groupe C (cd), tandis que les groupes A (de) et F (e) figuraient parmi les valeurs les plus basses.

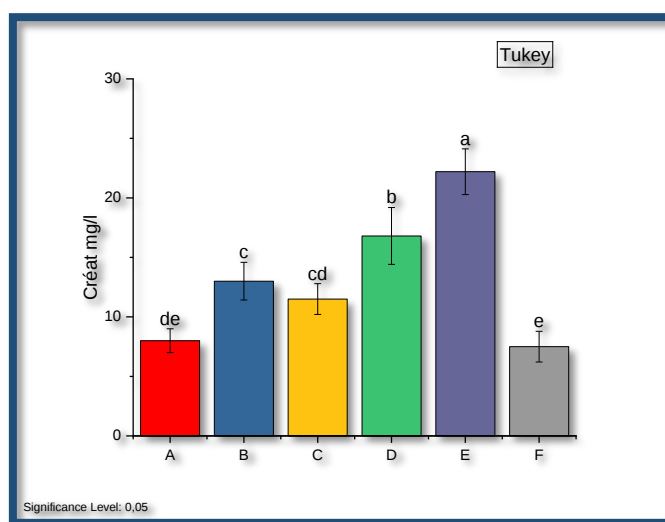


Figure 56: Taux de créatinine chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les taux de créatinine étaient significativement élevés dans les groupes D et E, en particulier dans le groupe E, tandis qu'ils restaient dans les limites de la normale dans les groupes A et F, avec des augmentations légères à modérées dans les groupes B et C.

La créatinine est un indicateur direct du débit de filtration glomérulaire (DFG), un DFG élevé reflétant une diminution de l'efficacité rénale dans l'élimination des déchets. La National Kidney Foundation (2012) a confirmé que toute augmentation de cet indicateur est un signe de dysfonctionnement rénal potentiel. L'Organisation mondiale de la Santé (2017) a

également indiqué que les variations des indicateurs rénaux sont souvent associées à des facteurs de stress ou à des effets toxiques sur les tissus.

Par ailleurs, cette élévation peut s'expliquer par le stress oxydatif induit par l'eau traitée au plasma, où les espèces réactives de l'oxygène (ERO) entraînent un dysfonctionnement des cellules rénales. Ceci a été confirmé par Sies H. (2017), qui a affirmé que le stress oxydatif provoque des perturbations fonctionnelles dans les tissus vitaux. Les études de Brisset J. L. et Pawlat J. (2016) ont également soutenu l'idée que l'effet de l'eau traitée dépend de la concentration et du type d'espèces réactives produites.

4.3.5. Dosage de l'urée:

Les résultats concernant l'urée ont montré une nette gradation des valeurs entre les groupes, la valeur la plus élevée étant enregistrée dans le groupe E (environ 0,9 g/L), suivie du groupe D (environ 0,6–0,65 g/L), puis du groupe B (environ 0,45–0,5 g/L) et enfin du groupe C (environ 0,35–0,4 g/L). Les groupes A et F ont enregistré les valeurs les plus faibles (environ 0,25 g/L). L'analyse de Tukey a révélé des différences significatives entre ces groupes, classant le groupe E dans le groupe (a), le groupe D dans le groupe (b), le groupe B dans le groupe (c) et le groupe C dans le groupe (cd), tandis que les groupes A et F ont été classés dans le groupe (d).

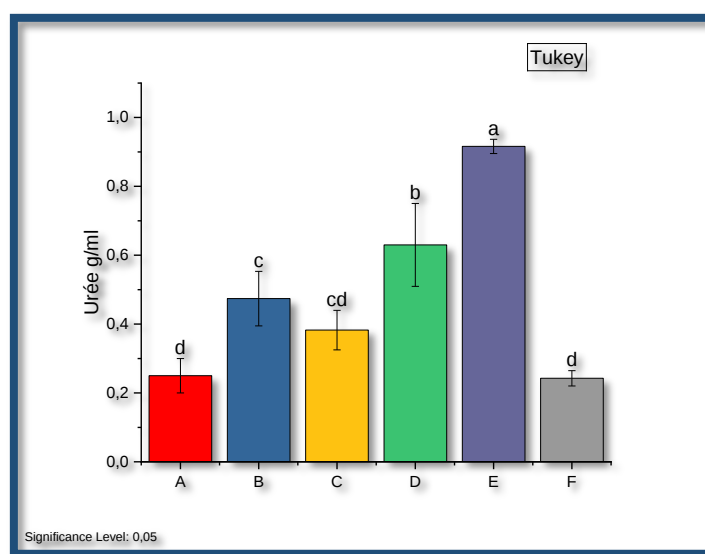


Figure 57: Taux d'Urée chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse de l'urée ont révélé un gradient net de valeurs entre les groupes expérimentaux. Le groupe A, ayant consommé de l'eau non traitée, est resté dans les limites de la normale, tandis que le groupe B (eau magnétisée) a enregistré une légère augmentation et le groupe C (eau traitée au plasma froid) une augmentation modérée. Le groupe D (eau magnétisée puis traitée au plasma) a montré une augmentation significative, et le groupe E (traitement au plasma suivi d'une magnétisation) a enregistré la valeur la plus élevée. Le groupe F, exposé à de l'eau non traitée puis aspergé d'eau traitée, est resté proche des valeurs de référence. Cette tendance à la hausse, particulièrement dans les groupes ayant reçu un double traitement, reflète l'impact potentiel de ces technologies sur l'équilibre métabolique et

les fonctions physiologiques liées à l'urée. Dans ce contexte, l'urée est un indicateur clé de la fonction rénale et du métabolisme protéique. Des taux d'urée élevés reflètent une perturbation potentielle du débit de filtration glomérulaire ou une altération de l'excrétion d'azote, comme l'ont démontré Brenner et Rector (2012) dans leur étude sur la physiologie rénale. Ceci concorde avec les niveaux particulièrement élevés observés dans le groupe E, suggérant une possible augmentation du stress fonctionnel rénal par rapport aux autres groupes. De plus, cette élévation peut s'expliquer par l'effet de l'eau traitée au plasma froid, qui contient des espèces réactives de l'oxygène (ERO). Ces ERO peuvent induire un stress oxydatif affectant les cellules rénales et perturbant leur fonction, comme l'ont montré Lukes et al. (2014) dans leur étude sur les espèces réactives dans l'eau traitée au plasma. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Brisset et Pawlat (2016) concernant les propriétés chimiques et biologiques de ce type d'eau.

Par ailleurs, ces résultats peuvent également s'expliquer d'un point de vue métabolique. L'eau traitée au plasma pourrait stimuler le catabolisme des protéines, augmentant la production d'ammoniac et sa conversion en urée dans le foie, ce qui accroît sa concentration sanguine. Wu et al. L'étude de (2017) a démontré que le stress oxydatif peut amplifier le catabolisme protéique, des résultats concordants avec ceux de Carocho et Ferreira (2013) concernant le rôle des radicaux libres dans l'activation des voies métaboliques cataboliques.

De plus, la magnétisation peut affecter l'équilibre ionique de l'eau et la perméabilité de la membrane cellulaire, induisant potentiellement des modifications de la distribution des fluides intracorporels et de la concentration d'azote plasmatique. Toledo et al. (2008) ont indiqué que l'eau magnétisée peut induire de subtiles altérations physiologiques de l'équilibre minéral, ce qui pourrait expliquer les différences observées entre les groupes. Par ailleurs, la combinaison du plasma et de la magnétisation, notamment dans les groupes D et E, peut modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau, y compris sa structure moléculaire et ses interactions de surface. Ceci pourrait renforcer l'efficacité et l'impact des espèces réactives au niveau biologique. Comme l'ont indiqué Pang et Deng (2008), les champs magnétiques peuvent influencer les propriétés et le comportement physique de l'eau, ce qui pourrait expliquer l'effet synergique observé dans les résultats.

À l'inverse, le fait que les taux d'urée soient restés dans les limites de la normale dans le groupe F suggère que l'exposition indirecte à l'eau traitée (par pulvérisation) était insuffisante pour produire un effet physiologique net, ou que la dose réelle de composés actifs n'a pas atteint le seuil d'influence biologique. On peut donc conclure que l'élévation de la concentration d'urée est liée à l'interaction de plusieurs mécanismes potentiels, notamment des effets sur la fonction rénale, la stimulation du métabolisme protéique et les modifications physico-chimiques de l'eau induites par le traitement. Ceci illustre le rôle synergique des techniques de plasma et de magnétisation dans l'obtention d'effets biologiques plus marqués.

4.3.6. Dosage de TGO (AST):

Les taux d'enzyme AST étaient significativement élevés dans les groupes D et E, oscillant entre 45 et 50 U/L, sans différence significative entre eux (groupe a). Les groupes B et C présentaient également des valeurs modérées et similaires (environ 33–35 U/L) et

appartenaient au même groupe statistique (b). À l'inverse, les valeurs les plus basses ont été enregistrées dans les groupes A et F (environ 20–22 U/L), sans différence significative entre eux (groupe c).

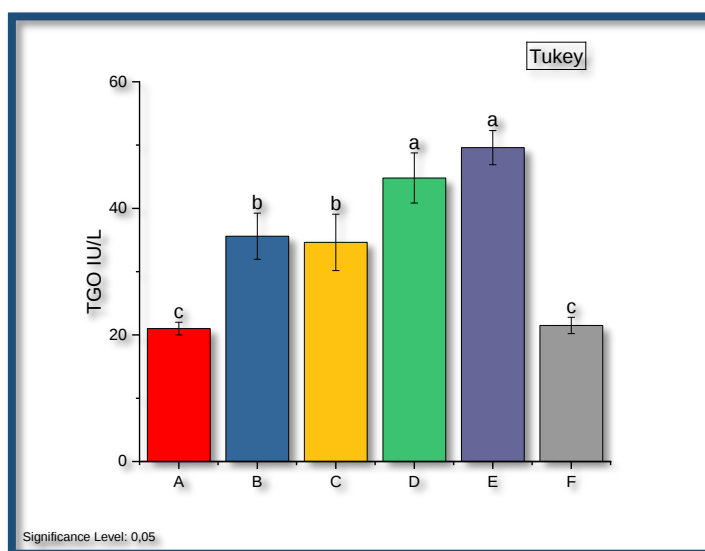


Figure 58: Taux de TGO chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse de l'enzyme TGO (AST) ont révélé des différences significatives entre les groupes expérimentaux. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les groupes D et E, en particulier dans le groupe E, tandis que les valeurs sont restées relativement faibles dans les groupes B et C, et proches de la normale dans les groupes A et F. Ceci reflète une différence dans le degré de lésion hépatocytaire selon le type de traitement de l'eau. Dans le groupe A (témoin), les valeurs étaient dans les limites de la normale, indiquant l'intégrité des hépatocytes et la stabilité de la perméabilité membranaire cellulaire en l'absence de toute intervention expérimentale. Le groupe B (eau magnétisée) a montré une légère variation non significative, suggérant que l'effet de la magnétisation sur le foie reste limité et insuffisant pour provoquer des lésions cellulaires importantes. Le groupe C (traitement au plasma froid) a montré une augmentation modérée de l'enzyme TGO. Ceci peut s'expliquer par la présence d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) produites par le plasma, susceptibles d'induire un stress oxydatif entraînant une augmentation de la perméabilité membranaire des cellules hépatiques et, par conséquent, une fuite d'enzyme dans la circulation sanguine. Le groupe D (magnétisation suivie d'un traitement plasma) a présenté une augmentation plus importante, indiquant un effet cumulatif résultant de l'interaction des deux traitements. Cette séquence de traitements pourrait amplifier l'activité des composés réactifs et accroître leur impact sur l'intégrité des hépatocytes.

À l'inverse, le groupe E (traitement plasma suivi d'une magnétisation) a enregistré les valeurs les plus élevées, reflétant un effet synergique plus marqué. Cette séquence pourrait accroître la stabilité ou l'activité des composés réactifs, entraînant une augmentation du stress oxydatif hépatique et une hausse significative des taux d'enzyme TGO. Dans le groupe F (exposition indirecte), les valeurs sont restées proches de la normale, indiquant que

l'exposition indirecte à l'eau traitée ne produit pas d'effet hépatotoxique significatif. La TGO (AST) est un biomarqueur important pour évaluer l'intégrité des hépatocytes. Ses taux augmentent en cas de lésions cellulaires ou d'augmentation de la perméabilité de la membrane plasmique. Comme l'ont démontré Giannini et Testa (2005), des taux élevés de TGO reflètent un certain degré de stress ou de lésion hépatique associé à une altération de l'intégrité cellulaire.

Ces résultats sont également cohérents avec ce que Reuter S. et al. (2010) ont montré, où ils ont démontré que le stress oxydatif résultant d'une augmentation des espèces ROS conduit à des dommages aux membranes cellulaires, ce qui contribue à la fuite d'enzymes dans le sang, ce qui explique l'augmentation enregistrée en particulier dans les groupes à double traitement.

4.3.7. Dosage de TGP (ALT):

Les concentrations de l'enzyme TGP (ALT) ont varié selon les groupes et le type de traitement de l'eau. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans le groupe E (plasma froid suivi d'une magnétisation), à environ 29–30 U/L, suivies du groupe D (magnétisation suivie d'un traitement au plasma), à environ 20 U/L. Les groupes B (magnétisation) et C (plasma) ont présenté des valeurs intermédiaires (15–17 U/L). À l'inverse, les valeurs les plus faibles ont été enregistrées dans les groupes A (eau non traitée) et F (eau non traitée avec pulvérisation), à environ 10–11 U/L.

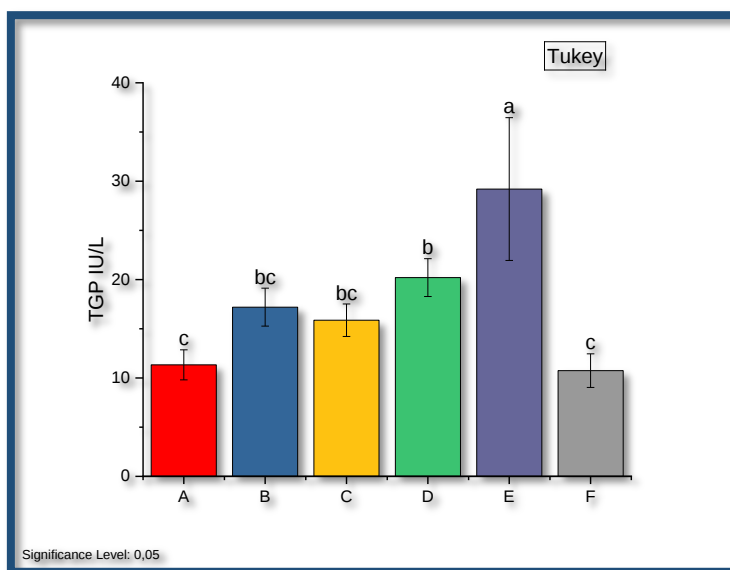


Figure 59: Taux de TGP chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse de l'enzyme ALT (TGP) indiquent des différences significatives entre les groupes expérimentaux. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans le groupe E, suivies du groupe D, puis des groupes B et C, tandis que les groupes A et F ont enregistré les valeurs les plus basses. L'ALT est un biomarqueur clé de l'évaluation de la santé hépatique, car des taux élevés sont associés à un stress ou à des lésions des hépatocytes dues à une perméabilité accrue de la membrane cellulaire et à une fuite d'enzyme dans la circulation sanguine.

L'augmentation marquée dans le groupe E peut s'expliquer par le fait que le traitement combiné (plasma froid suivi de magnétisation) exerce un effet oxydatif plus important sur le foie, entraînant un stress cellulaire significatif et se traduisant par une activité ALT accrue dans le sang. Le gradient des valeurs ($E > D > B \approx C$) reflète également un effet cumulatif/synergique entre les deux techniques de traitement, leur effet combiné étant plus prononcé que celui des traitements individuels. Ces résultats concordent avec ceux de Pratt D. S. et Kaplan M. M. (2000), qui ont confirmé qu'un taux élevé d'ALT est un indicateur direct de stress hépatique.

De plus, ces résultats pourraient être liés aux propriétés de l'eau traitée par plasma, susceptible de contenir des espèces réactives de l'oxygène (ERO) capables d'induire des modifications oxydatives dans les tissus biologiques, notamment en combinaison avec la magnétisation, renforçant ainsi ses effets biologiques. Brisset J. L. et Pawlat J. (2016) ont également indiqué que l'eau traitée par plasma peut affecter les systèmes biologiques en fonction de ses propriétés chimiques et de ses produits réactifs. En revanche, les valeurs sont restées stables dans le groupe F (exposition indirecte) et ont diminué dans le groupe A, suggérant qu'une exposition indirecte ou l'absence de traitement n'entraîne pas d'effets hépatiques significatifs. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle la consommation directe de l'eau traitée est nécessaire pour qu'un effet biologique se manifeste clairement.

Globalement, ces résultats soulignent que le double traitement, en particulier la séquence plasma puis magnétisation, produit un effet synergique qui conduit à une augmentation de l'activité de l'enzyme ALT, indiquant un stress oxydatif au niveau hépatique, contrairement à l'effet limité des traitements uniques ou indirects.

4.3.8. Dosage de Cholestérol:

Les résultats de l'analyse du cholestérol total (CHOL g/L) ont révélé des différences statistiquement significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de signification de 0,05, selon le test de Tukey.

Le groupe E (eau traitée au plasma puis magnétisée) a enregistré la valeur de cholestérol total la plus élevée et a été classé comme groupe (a).

Le groupe D (eau traitée par magnétisation puis au plasma) est arrivé en deuxième position avec une différence statistiquement significative par rapport au groupe E et a été classé comme groupe (b).

Les groupes B (eau magnétisée) et C (eau traitée au plasma) ont présenté des valeurs statistiquement similaires et intermédiaires et ont été classés dans le même groupe statistique (c).

Les groupes A (eau pure) et F (eau pure ayant subi différents traitements par pulvérisation) ont enregistré les valeurs de cholestérol total les plus faibles, sans différence statistiquement significative entre eux, et ont été classés comme groupe (d).

Les résultats ont mis en évidence une augmentation progressive des valeurs de cholestérol des groupes témoins aux groupes ayant subi un double traitement. Les barres d'erreur ont

également montré une variance relativement faible au sein de la plupart des groupes expérimentaux, indiquant une homogénéité des valeurs entre les individus de chaque groupe.

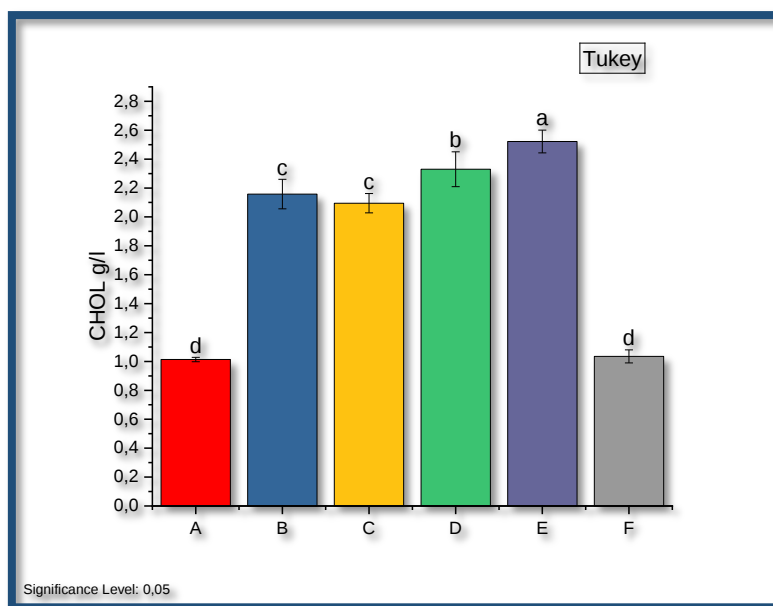


Figure 60: Taux de cholestérol chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse du cholestérol total indiquent des différences significatives entre les groupes expérimentaux ($p < 0,05$), reflétant un effet net des traitements de physiothérapie aquatique sur le métabolisme lipidique chez la souris. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans le groupe E, suivies du groupe D, démontrant que le double traitement (plasma froid suivi de magnétisation) induit des modifications significatives de l'équilibre lipidique par rapport aux autres groupes. Le cholestérol est un indicateur clé de la fonction hépatique et de la régulation du métabolisme lipidique, car des taux élevés sont associés à des troubles métaboliques et à une augmentation de la synthèse endogène des lipides, comme l'a démontré l'Organisation mondiale de la Santé dans une étude de 2017. L'augmentation observée dans les groupes D et E peut s'expliquer par un effet synergique résultant de la combinaison des techniques de plasma froid et de magnétisation, entraînant une augmentation du stress oxydatif dans l'organisme, perturbant ainsi la fonction hépatique et stimulant la synthèse lipidique. Ces résultats concordent avec l'étude de Reuter S. et al. (2010), qui a confirmé le rôle central du stress oxydatif dans la promotion de la synthèse lipidique et l'élévation du cholestérol.

En revanche, les groupes B (eau magnétisée) et C (eau traitée au plasma) ont présenté des valeurs moyennes statistiquement similaires, indiquant que les traitements simples ont un effet limité comparé aux traitements doubles. Ceci peut s'expliquer par les légères modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau, qui affectent indirectement le métabolisme lipidique sans provoquer de perturbations significatives, conformément aux résultats de Pang X. F. et Deng B. (2008). Les groupes A et F ont enregistré les valeurs les plus basses, sans différence significative entre eux, reflétant l'état physiologique normal de l'homéostasie lipidique en l'absence d'effet direct des traitements physiques. Ceci confirme

que les augmentations enregistrées dans les autres groupes sont principalement dues à l'effet du traitement et non à des facteurs externes, comme l'indique l'OCDE (2008).

De plus, les barres d'erreur ont montré une faible variabilité au sein de la plupart des groupes, indiquant l'homogénéité des résultats et la stabilité des conditions expérimentales, ce qui renforce la fiabilité des données obtenues. La variabilité réduite indique une réponse similaire chez les individus au sein de chaque groupe, un schéma fréquemment observé dans les études sur le stress oxydatif, comme l'ont confirmé Reuter S. et al. (2010).

Globalement, ces résultats soulignent que le double traitement de l'eau (plasma froid et magnétisation) produit un net effet synergique entraînant une augmentation du taux de cholestérol total. Ceci suggère le rôle du stress oxydatif et d'une altération de la fonction hépatique comme mécanismes clés expliquant ces variations, contrairement à l'effet limité des traitements individuels.

4.3.9. Dosage de Tri-Glycérides:

L'analyse des triglycérides (TRIG g/L) a révélé des différences significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de signification de 0,05, selon le test de Tukey.

Les groupes D (eau magnétisée puis plasma) et E (plasma puis eau magnétisée) ont enregistré les valeurs de triglycérides les plus élevées et appartenaient au même groupe statistique (a), indiquant l'absence de différence significative entre eux.

Le groupe B (eau magnétisée) a présenté une valeur intermédiaire et a été classé comme statistiquement significatif (b), avec une différence significative par rapport aux groupes D et E.

Les groupes C (eau traitée au plasma) et F (eau pure avec traitements par pulvérisation) ont présenté des valeurs statistiquement similaires et appartenaient au groupe statistique (bc).

Le groupe A (eau pure) a enregistré la valeur de triglycérides la plus faible et a été classé comme statistiquement significatif (c).

Ces résultats ont mis en évidence une augmentation progressive des valeurs de triglycérides dans les groupes ayant subi le double traitement, comparativement aux groupes témoins et aux groupes ayant reçu un seul traitement. Les barres d'erreur ont également montré une variabilité relativement faible dans la plupart des groupes, avec une dispersion relativement plus importante observée dans le groupe D par rapport aux autres groupes.

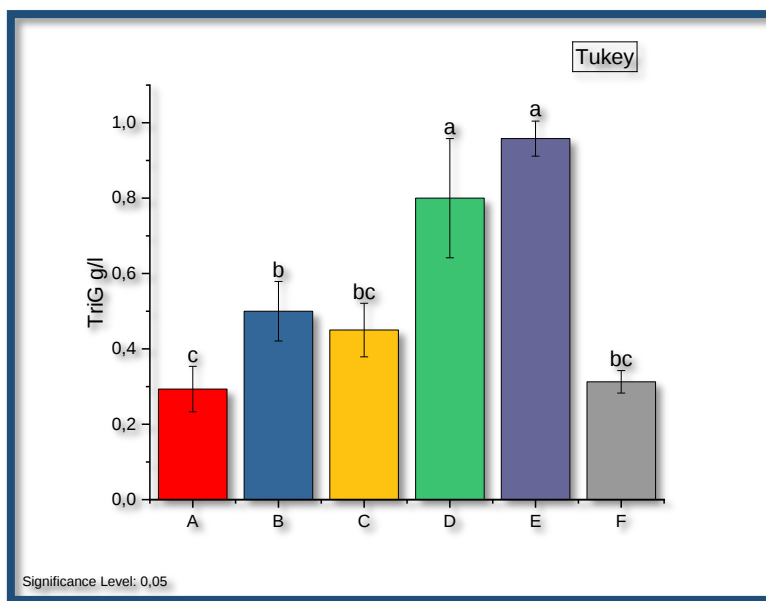


Figure 61: Taux des triglycérides chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse des triglycérides indiquent des différences significatives entre les groupes expérimentaux ($p < 0,05$), reflétant un effet net de la physiothérapie aquatique sur le métabolisme lipidique chez la souris. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les groupes D et E, démontrant que le traitement combiné (magnétisation et plasma froid) induit des modifications significatives de l'équilibre métabolique par rapport aux autres groupes. Les triglycérides sont un indicateur clé de l'état métabolique et de la fonction hépatique, car des taux élevés sont associés à une augmentation du stockage d'énergie et à une altération du métabolisme lipidique, comme l'a démontré l'Organisation mondiale de la Santé dans une étude de 2017. Cette augmentation dans les groupes D et E peut s'expliquer par un effet synergique résultant de la combinaison des techniques de magnétisation et de plasma, entraînant une augmentation du stress oxydatif dans l'organisme. Ce dernier, à son tour, affecte la fonction hépatique et stimule la synthèse lipidique ou inhibe son métabolisme. Ces résultats concordent avec l'étude de Reuter S. et al. (2010), qui a confirmé que le stress oxydatif contribue directement à l'accumulation de triglycérides et au déséquilibre métabolique.

En revanche, le groupe B (eau magnétisée) a présenté une valeur intermédiaire, indiquant que la magnétisation seule pourrait avoir un effet limité sur le métabolisme lipidique par rapport au traitement combiné. Ceci peut s'expliquer par des modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau qui affectent indirectement les processus métaboliques, conformément aux résultats de Pang X. F. et Deng B. (2008). Les groupes C et F ont présenté des valeurs statistiquement similaires, suggérant que le traitement par plasma seul ou la pulvérisation externe n'entraînent pas de modifications significatives des taux de triglycérides. Ceci reflète le fait que l'effet du plasma reste limité en l'absence de facteurs synergiques, conformément aux résultats de Martínez-Sánchez A. et al. (2014).

Parallèlement, le groupe A (eau non traitée) a enregistré la valeur la plus basse, représentant l'état physiologique normal du métabolisme lipidique en l'absence de toute intervention expérimentale. Ceci confirme que les augmentations observées dans les autres groupes sont principalement dues aux effets des traitements physiques de l'eau, comme indiqué dans l'OCDE (2008). De plus, les barres d'erreur ont montré une faible variabilité dans la plupart des groupes, indiquant l'homogénéité des résultats et la stabilité des conditions expérimentales. Cependant, une plus grande variabilité a été observée dans le groupe D, ce qui pourrait refléter des différences individuelles de réponse au stress oxydatif ou des modifications métaboliques induites par le double traitement. Ce schéma est fréquent dans les études portant sur les dyslipidémies, comme l'ont confirmé Reuter S. et al. (2010).

Globalement, ces résultats soulignent que le double traitement de l'eau (magnétisation et plasma froid) produit un net effet synergique entraînant une élévation des taux de triglycérides, suggérant le rôle du stress oxydatif et d'une altération de la fonction hépatique comme mécanismes clés expliquant ces variations, contrairement à l'effet limité des traitements individuels.

4.3.10. Dosage de LDL:

L'analyse du LDL (g/L) a révélé des différences significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de signification de 0,05 selon le test de Tukey.

Le groupe E (traitement plasma suivi d'une magnétisation) a enregistré la valeur de LDL la plus élevée et a été désigné (a). Le groupe D (magnétisation suivie d'un traitement plasma) arrive en deuxième position, avec une différence significative par rapport au groupe E, et a été désigné (b). Les groupes A (eau pure), B (eau magnétisée), C (eau traitée au plasma) et F (eau pure avec pulvérisation des traitements) ont présenté des valeurs faibles et statistiquement similaires, appartenant tous au même groupe statistique (c).

Le groupe A a enregistré la valeur de LDL la plus basse par rapport aux autres groupes expérimentaux. Les résultats ont montré une nette augmentation des valeurs de LDL dans les groupes ayant reçu un double traitement par rapport aux groupes témoins et aux groupes ayant reçu un seul traitement.

Les barres d'erreur ont révélé une variabilité relativement plus importante dans le groupe D que dans les autres groupes, tandis que les valeurs du groupe E sont apparues plus stables malgré une moyenne élevée.

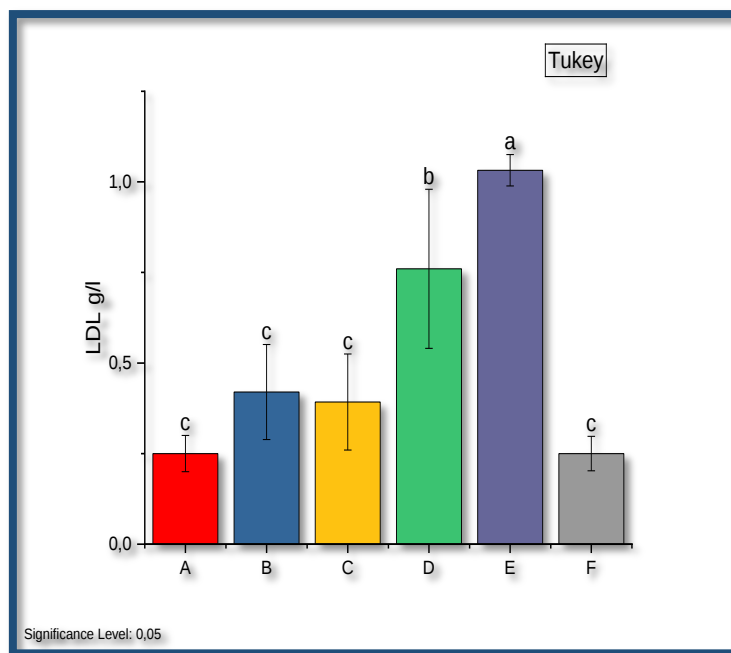


Figure 62: Taux du LDL chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse des lipoprotéines de basse densité (LDL) indiquent des différences significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de 0,05, reflétant un effet net des traitements de physiothérapie aquatique sur le métabolisme lipidique. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans le groupe E, suivies du groupe D, démontrant que le traitement combiné (plasma froid et magnétisation) induit des modifications significatives de l'équilibre lipidique par rapport aux autres groupes. Le LDL est connu comme le « mauvais » cholestérol, car des taux élevés sont associés à un risque accru de stress oxydatif, d'inflammation et de troubles métaboliques. Ces résultats concordent avec une étude de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), qui a indiqué qu'un taux élevé de LDL est un indicateur clé du déséquilibre lipidique (comme démontré dans l'étude de l'OMS de 2017). L'augmentation observée dans les groupes D et E peut s'expliquer par un fort effet synergique résultant de la combinaison des techniques de plasma froid et de magnétisation, entraînant une production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), favorisant ainsi l'oxydation des lipides et perturbant leur métabolisme, notamment au niveau du foie. Ces résultats concordent avec l'étude de Reuter S. et al. (2010), qui a confirmé que le stress oxydatif joue un rôle crucial dans l'oxydation des lipides et l'élévation du cholestérol LDL. En revanche, les groupes A, B, C et F ont présenté des valeurs statistiquement similaires et faibles, indiquant que la monothérapie (magnétisation ou plasma seul) ou l'absence de traitement n'ont pas d'effet significatif sur les taux de LDL. Ceci reflète le fait que l'impact biologique de ces techniques reste limité en l'absence d'interaction synergique entre elles, ce qui concorde avec les résultats de Martínez-Sánchez A. et al. (2014), qui ont constaté que les effets biologiques de la physiothérapie sont plus prononcés lorsque plusieurs techniques sont combinées.

Le groupe A (eau non traitée) a également enregistré la valeur la plus basse, représentant l'état physiologique normal de l'homéostasie lipidique, confirmant ainsi que les

augmentations observées dans les autres groupes sont principalement dues aux effets des traitements de physiothérapie et non à des facteurs externes. Cette observation concorde avec les conclusions du rapport de l'OCDE (2008), qui indiquait que les valeurs de référence normales sont généralement enregistrées en l'absence d'influences environnementales ou expérimentales.

De plus, les barres d'erreur ont révélé une plus grande variabilité dans le groupe D comparativement aux autres groupes, reflétant potentiellement des différences individuelles de réponse au stress oxydatif entre les échantillons. En revanche, les valeurs du groupe E sont apparues plus stables malgré une moyenne plus élevée, suggérant une réponse relativement homogène au double traitement intensif. Ce schéma est fréquent dans les études portant sur les dyslipidémies et le stress oxydatif, comme l'ont confirmé Reuter et al. (2010).

Globalement, ces résultats soulignent que la combinaison des techniques de plasma froid et de magnétisation induit un net effet synergique, se traduisant par une augmentation du taux de LDL. Ceci suggère le rôle du stress oxydatif comme mécanisme clé pour expliquer ces changements et met en évidence l'effet limité des traitements uniques par rapport aux traitements combinés.

4.3.11. Dosage de HDL:

Les résultats de l'analyse du cholestérol HDL (en g/L) ont révélé des différences statistiquement significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de 0,05 selon le test de Tukey.

Le groupe E (eau traitée au plasma puis magnétisée) a enregistré la valeur de HDL la plus élevée et a été classé dans le groupe statistique (a). Le groupe D (eau traitée par magnétisation puis au plasma) est arrivé en deuxième position, avec une différence significative par rapport au groupe E, et a été classé dans le groupe statistique (b).

Les groupes A (eau pure), B (eau magnétisée), C (eau traitée au plasma) et F (eau pure ayant subi les deux traitements) ont présenté des valeurs faibles et statistiquement similaires, appartenant tous au même groupe statistique (c). Le groupe F a enregistré la valeur de HDL la plus basse parmi les groupes expérimentaux.

Les résultats ont également montré une augmentation progressive des valeurs de HDL dans les groupes ayant subi le double traitement par rapport aux groupes témoins et à ceux ayant subi un seul traitement. Les barres d'erreur ont montré une variabilité relativement plus grande dans le groupe D par rapport aux autres groupes, tandis que les valeurs du groupe E sont apparues plus stables malgré leur moyenne élevée.

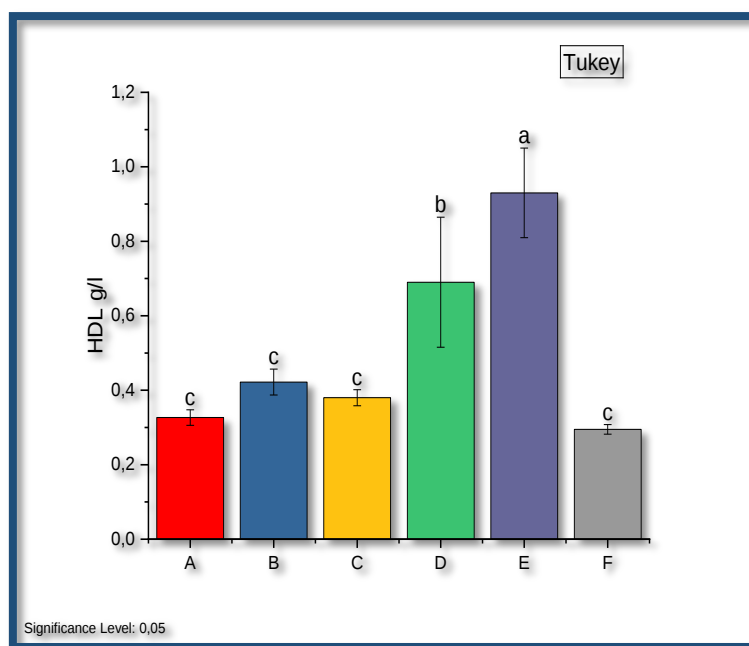


Figure 63: Taux des HDL chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse des lipoprotéines de haute densité (HDL) indiquent une augmentation significative de leur taux dans les groupes D et E, en particulier dans le groupe E (traité par plasma puis par magnétisation), comparativement aux groupes contrôle et monothérapie. Ceci reflète un effet net du double traitement sur le métabolisme lipidique. Les HDL sont connues pour leur rôle protecteur dans le transport du cholestérol des tissus périphériques vers le foie via le mécanisme appelé transport inverse du cholestérol. Par conséquent, leur élévation est un indicateur positif d'une amélioration de l'équilibre lipidique. Ces résultats concordent également avec les observations de Barter P. et al. (2007) et de Gordon D. et al. (1989), qui ont souligné le rôle protecteur des HDL dans la réduction des dyslipidémies. Cette augmentation peut s'expliquer par le fait que le double traitement a stimulé le métabolisme lipidique, notamment le transport inverse du cholestérol, favorisant ainsi l'élimination du cholestérol en excès des tissus. Cet effet pourrait également être lié au léger stress oxydatif induit par l'eau traitée au plasma, qui contient des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (RONS) déclenchant une réponse adaptative de l'organisme. Cette réponse inclut une augmentation de la production de HDL comme mécanisme de défense contre l'oxydation, conformément aux résultats de Sies H. (2017) et de Privat-Maldonado A. et al. (2019), qui ont démontré qu'un stress oxydatif modéré peut induire des réponses protectrices. De plus, une différence est observée entre les groupes D et E, suggérant que la séquence de traitement (plasma suivi de magnétisation) pourrait renforcer l'effet biologique, probablement en améliorant la stabilité des molécules actives ou en augmentant leur biodisponibilité. Ceci reflète un net effet synergique entre les deux techniques. Brisset J. L. et Pawlat J. (2016) ont également indiqué que les propriétés de l'eau traitée par plasma peuvent varier selon les conditions et la séquence de traitement, influençant ainsi son effet biologique.

En revanche, les groupes A, B, C et F ont présenté des valeurs similaires, sans différence significative, indiquant qu'une monothérapie ou l'absence de traitement n'entraîne pas de modifications significatives des taux de HDL. Ceci reflète la capacité de l'organisme à maintenir l'homéostasie lipidique en l'absence d'un fort effet synergique. Une plus grande variabilité a été observée dans le groupe D comparativement au groupe E, qui a présenté une stabilité relative malgré des valeurs élevées. Ceci pourrait suggérer une variabilité individuelle dans le premier cas, contre un effet plus homogène et stable dans le second. Ce schéma est fréquent dans les études portant sur le stress oxydatif et l'adaptation métabolique.

Globalement, ces résultats soulignent que le double traitement, en particulier la séquence plasma-magnétique, produit un effet synergique positif en augmentant les taux de HDL. Ceci suggère l'activation de mécanismes protecteurs liés au transport du cholestérol et à la résistance au stress oxydatif, contrairement à l'effet limité de la monothérapie.

4.3.12. Dosage du CRP:

Les résultats de l'analyse de la protéine C-réactive (CRP), exprimée en mg/L, ont révélé des différences significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de 0,05 selon le test de Tukey. Le groupe E (eau traitée au plasma puis magnétisée) a enregistré la valeur de CRP la plus élevée et a été désigné par (a).

Le groupe D (eau traitée par magnétisation puis au plasma) arrive en deuxième position, avec une différence significative par rapport au groupe E, et a été désigné par (b).

Le groupe B (eau magnétisée) a présenté une valeur relativement élevée et appartient au groupe statistique (bc). Le groupe C (eau traitée au plasma) a enregistré une valeur intermédiaire et a été désigné par (cd).

Le groupe A (eau non traitée) a présenté une valeur relativement faible et appartient au groupe statistique (de). Le groupe F (eau non traitée par pulvérisation) a enregistré la valeur de CRP la plus basse et a été désigné par (e).

Ces résultats ont mis en évidence une augmentation progressive des valeurs de CRP dans les groupes ayant subi un double traitement par rapport aux groupes témoins et aux groupes ayant reçu un seul traitement. Les barres d'erreur ont également montré une variabilité relativement plus grande dans les groupes D et E par rapport aux autres groupes, tandis que les valeurs semblaient plus homogènes dans les groupes A et F.

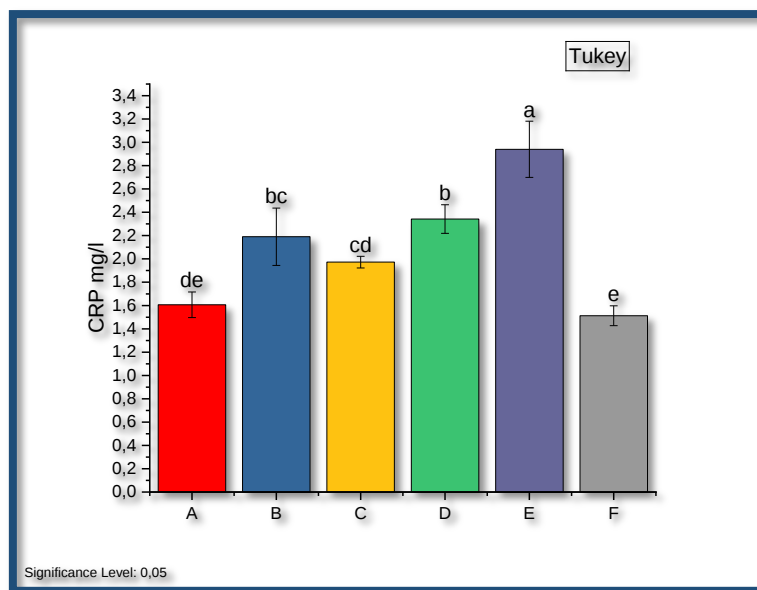


Figure 64: Taux de la protéine C-réactive (CRP) chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les résultats de l'analyse de la protéine C-réactive (CRP) indiquent des différences significatives entre les groupes expérimentaux, reflétant l'effet des traitements à l'eau physiologique sur la réponse inflammatoire chez les souris. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans le groupe E, suivies du groupe D, indiquant que le double traitement (plasma froid suivi d'eau magnétisée) stimule plus fortement les voies inflammatoires que les autres groupes. La CRP est un biomarqueur clé de l'inflammation, dont les taux augmentent en réponse au stress oxydatif et à l'activation du système immunitaire. Cette augmentation dans les groupes D et E peut s'expliquer par la production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) induite par le double traitement, entraînant l'activation des voies inflammatoires et une sécrétion accrue de protéines inflammatoires. Ces résultats concordent avec l'étude de Reuter S. et al. (2010), qui a démontré le lien étroit entre le stress oxydatif et l'activation de la réponse inflammatoire.

En revanche, les groupes B (eau magnétisée) et C (eau traitée au plasma) ont présenté des valeurs inférieures à celles des groupes ayant reçu un double traitement, indiquant que les traitements individuels ont un effet relativement limité sur la réponse inflammatoire. Ceci renforce l'hypothèse d'un effet synergique lorsque les deux techniques sont combinées, la réponse biologique devenant alors plus marquée. Ces résultats concordent avec les conclusions de l'Organisation mondiale de la Santé (2017) concernant l'association entre le stress oxydatif et l'augmentation des marqueurs inflammatoires. Les groupes A (eau non traitée) et F (eau non traitée avec pulvérisation d'eau traitée) ont affiché de faibles valeurs, en particulier le groupe F, qui a présenté le taux de CRP le plus bas, indiquant l'absence de réponse inflammatoire significative. Ceci suggère que la pulvérisation externe ne produit pas le même effet physiologique que la consommation directe d'eau traitée, conformément aux rapports de l'OCDE (2008).

Par ailleurs, les barres d'erreur ont montré une plus grande variabilité dans les groupes D et E que dans les autres groupes, reflétant potentiellement des différences individuelles dans les réponses au stress oxydatif chez les animaux. L'homogénéité des groupes A et F indique un état physiologique stable. Ce schéma est fréquent dans les études portant sur l'inflammation et le stress oxydatif, comme l'ont confirmé Reuter S. et al. (2010).

Globalement, ces résultats soulignent que le double traitement de l'eau produit un net effet synergique qui stimule la réponse inflammatoire, suggérant le rôle du stress oxydatif comme mécanisme clé pour expliquer l'élévation de la CRP, contrairement à l'effet limité des traitements uniques ou indirects.

4.3.13. Dosage du Glycémie:

L'analyse de la glycémie (Gly en g/L) a révélé des différences statistiquement significatives entre les groupes expérimentaux au seuil de signification de 0,05, selon le test de Tukey. Le groupe E (eau traitée au plasma puis magnétisée) a enregistré la glycémie la plus élevée et a été désigné (a). Le groupe D (eau traitée par magnétisation puis au plasma) arrive en deuxième position, avec une différence significative par rapport au groupe E, et a été désigné (b). Les groupes A (eau pure), B (eau magnétisée), C (eau traitée au plasma) et F (eau pure ayant reçu les deux traitements par pulvérisation) ont présenté des valeurs faibles et statistiquement similaires, appartenant tous au même groupe statistique (c).

Les groupes A et F ont enregistré les glycémies les plus basses par rapport aux autres groupes expérimentaux. Les résultats ont mis en évidence une augmentation progressive de la glycémie dans les groupes ayant subi le double traitement par rapport aux groupes témoins et aux groupes ayant reçu un seul traitement. Les barres d'erreur ont également montré une variabilité relativement plus importante dans le groupe E par rapport aux autres groupes, tandis que ces derniers semblaient plus homogènes en termes de valeurs enregistrées.

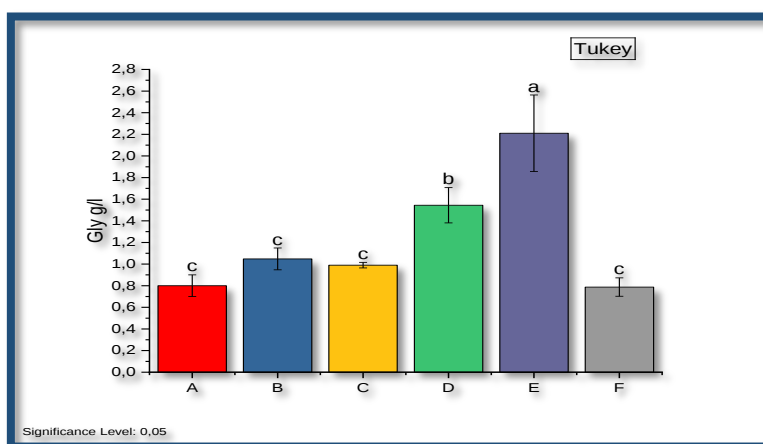


Figure 65: Taux de glycémie chez des groupes de rats ayant reçu de l'eau traitée, comparés au groupe témoin et au groupe ayant reçu une pulvérisation.

Les taux de glucose sanguin (glycémie) étaient significativement élevés dans les groupes D et E, les valeurs les plus élevées étant enregistrées dans le groupe E (traitement au plasma suivi d'une magnétisation), comparativement aux groupes témoins et aux groupes ayant reçu

un seul traitement. Cette augmentation suggère qu'un double traitement de l'eau pourrait avoir un impact significatif sur le métabolisme du glucose.

Ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs mécanismes étayés par la littérature scientifique. D'une part, l'eau traitée au plasma froid est connue pour contenir des espèces réactives de l'oxygène (ERO), qui contribuent au stress oxydatif dans les tissus vivants. Ce stress peut affecter négativement les cellules bêta du pancréas, responsables de la sécrétion d'insuline, et réduire la sensibilité des tissus à cette hormone, entraînant une élévation de la glycémie. Ceci a été démontré dans l'étude de Lukes et al. (2014) sur le rôle des espèces réactives dans les fluides traités au plasma, et ces résultats concordent avec les recherches de Privat-Maldonado et al. (2019) sur les effets biologiques de l'eau traitée au plasma. De plus, le stress oxydatif est un facteur majeur associé à une altération du métabolisme du glucose. Elle peut inhiber la sécrétion d'insuline ou induire une insulino-résistance, entraînant une accumulation de glucose dans le sang au lieu de son absorption par les cellules. Ce phénomène a été démontré par Robertson et al. (2004) dans leur étude sur le dysfonctionnement des cellules β pancréatiques induit par le stress oxydatif, et confirmé par Evans et al. (2002) dans leur étude sur le lien entre le stress oxydatif et le développement de l'insulino-résistance. Par ailleurs, l'augmentation plus marquée observée dans le groupe E par rapport au groupe D reflète un possible effet synergique lié à la séquence de traitement (plasma suivi de magnétisation). La magnétisation pourrait renforcer ou stabiliser l'activité des espèces réactives, amplifiant ainsi les effets biologiques au niveau métabolique, comme l'ont indiqué Brisset et Pawlat (2016) dans leur étude sur les effets chimiques de l'eau traitée au plasma.

En revanche, l'absence de différences significatives entre les groupes B et C par rapport au groupe témoin indique que l'effet de la magnétisation ou du plasma, pris isolément, demeure limité, notamment à faibles doses. Ceci est conforme aux données de la littérature, comme l'ont montré Toledo et al. L'étude de (2008) a démontré que l'effet de l'eau magnétisée sur les marqueurs métaboliques demeure faible, voire négligeable, dans de nombreux cas. Il apparaît donc que l'effet observé sur la glycémie est principalement lié à l'interaction entre les deux traitements. Cette hypothèse est corroborée par des études antérieures qui soulignent l'importance des effets synergiques dans l'évaluation des technologies modernes de traitement de l'eau et de leur impact biologique.

4.3. Résultats d'étude histologique:

4.3.1. Le foie:

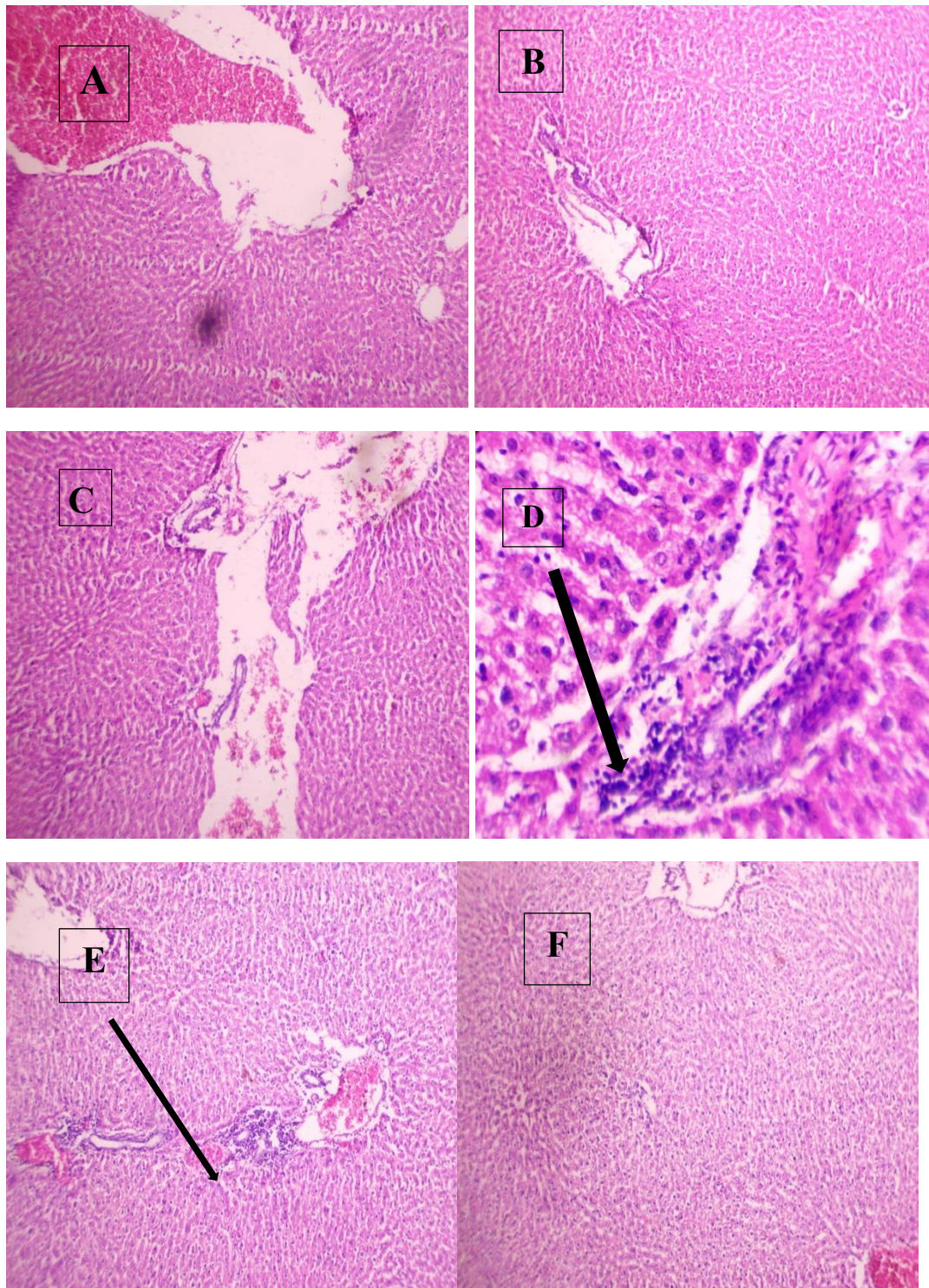


Figure 66: Examen microscopique du tissu hépatique (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez les rats.

Les analyses histologiques du foie ont révélé des différences entre les groupes expérimentaux. Une structure normale a été observée dans certains groupes, tandis que des altérations cellulaires légères à modérées ont été constatées dans d'autres, notamment ceux

ayant reçu les traitements combinés. Ces résultats peuvent s'expliquer par des analyses biochimiques antérieures, qui ont mis en évidence des modifications des enzymes hépatiques, principalement la transglutaminase (AST) et la transglutaminase (ALT). Le foie est le principal organe responsable de la détoxification et du métabolisme des composés étrangers, ce qui le rend très sensible à toute altération des propriétés de l'eau consommée. L'élévation des taux d'enzymes de transglutaminase observée dans certains groupes reflète un stress cellulaire ou une atteinte partielle des hépatocytes, concordant avec des manifestations histologiques telles que la dégénérescence ou la congestion cellulaires. Berg et al. (2002) ont indiqué qu'une augmentation de l'activité des transaminases dans le sang est un indicateur sensible des lésions hépatocytaires et du passage de leur contenu dans la circulation sanguine. Ces modifications peuvent également être liées au stress oxydatif induit par le traitement au cryoplasme. Cette technique génère des espèces réactives de l'oxygène (ROS), susceptibles de perturber l'équilibre redox au sein des cellules hépatiques. Cette perturbation entraîne des lésions des membranes cellulaires et des mitochondries, expliquant les modifications histologiques et l'élévation des taux d'enzymes. Valko M. et al. (2007) ont démontré que le stress oxydatif est l'un des mécanismes les plus importants à l'origine des lésions hépatiques.

Par ailleurs, les groupes présentant un tissu hépatique normal avaient des valeurs normales ou quasi normales lors de leurs analyses biochimiques, indiquant que le traitement (en particulier la magnétisation ou la séquence appropriée des techniques) n'avait pas d'effets indésirables significatifs sur le foie. Ceci reflète la capacité du foie à s'adapter à des variations mineures grâce à ses systèmes de défense antioxydants, comme l'a noté Sies H. (2017). De plus, la différence entre les groupes, notamment entre D et E, confirme que la séquence de traitement (magnétisation ↔ plasma) joue un rôle crucial dans la détermination de l'intensité de l'effet, car une séquence spécifique peut augmenter ou diminuer la stabilité des molécules réactives dans l'eau, affectant ainsi les cellules hépatiques. Brisset J.-L. (2012) ont démontré que l'effet du plasma froid dépend fortement des conditions de traitement et des réactions ultérieures dans le milieu.

4.3.2. Les reins:

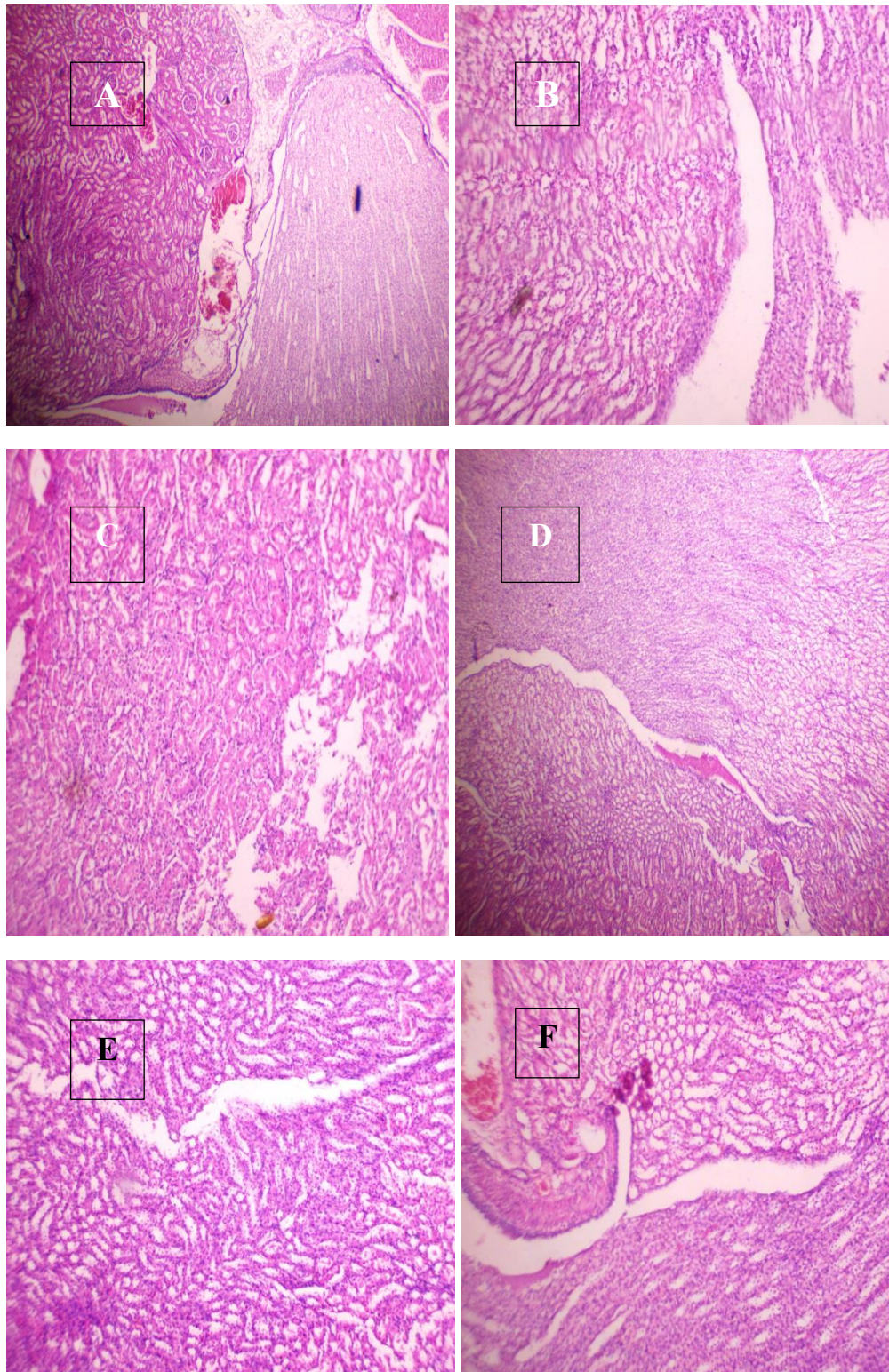


Figure 67: Examen microscopique de tissu rénal (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez les rats .

La préservation de la structure normale du tissu rénal dans tous les groupes (A, B, C, D, E et F) concorde avec les modifications biochimiques précédemment rapportées, notamment en ce qui concerne les taux d'urée et de créatinine. Bien que de légères ou modérées élévations

de ces indicateurs aient été observées, en particulier dans les groupes de traitement combiné (D et E), l'absence de toute modification histologique pathologique suggère que ces perturbations demeurent fonctionnelles et transitoires, et n'ont pas entraîné de lésions structurelles permanentes du rein.

Cette cohérence des résultats peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de l'urée, par exemple, peut être due à des modifications du métabolisme protéique ou à une augmentation de sa production plutôt qu'à une insuffisance rénale avérée. De même, toute légère variation de la créatinine peut refléter un ajustement temporaire du débit de filtration glomérulaire sans être associée à des lésions tissulaires. Brenner B. M. a indiqué que les indicateurs biochimiques de la fonction rénale peuvent évoluer avant l'apparition de toute lésion tissulaire et que le rein possède une importante capacité de compensation qui maintient son intégrité structurelle aux premiers stades du stress. En revanche, l'impact potentiel des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (ERO/ERN), notamment dans les groupes C, D et E, pourrait expliquer ces modifications biochimiques mineures sans pour autant induire de lésions tissulaires, ces espèces restant dans les limites de neutralisation des systèmes antioxydants. Sies H. (2017) a démontré que le stress oxydatif ne se traduit par des lésions structurelles que lorsqu'un certain seuil d'intensité et de durée est dépassé, seuil qui n'a pas été atteint dans cette étude.

De plus, l'absence de différences histologiques entre les groupes, y compris les groupes D et E qui présentaient les valeurs biochimiques les plus élevées, confirme que l'intensité de l'exposition était insuffisante pour induire une véritable néphrotoxicité. Ceci concorde avec l'affirmation de l'Organisation mondiale de la Santé (2017) selon laquelle l'évaluation des effets rénaux doit associer des indicateurs fonctionnels (urée et créatinine) à un examen histologique, car de faibles variations de ces indicateurs ne sont pas nécessairement synonymes de lésions organiques. De plus, les résultats obtenus dans le groupe F (exposition indirecte), qui ont démontré une stabilité biologique et histologique, confirment l'hypothèse selon laquelle l'effet dépend de l'intensité et de la durée de l'exposition directe, et que la biodisponibilité intracellulaire (absorption, distribution, métabolisme) joue un rôle crucial dans la protection du rein contre tout effet indésirable potentiel. Ainsi, la corrélation entre les résultats histologiques et biochimiques indique que le rein est resté dans un état de compensation fonctionnelle stable et que les variations observées pour certains indicateurs sont demeurées dans les limites physiologiques d'adaptation, sans progression vers une lésion tissulaire. Ceci reflète l'innocuité globale des traitements étudiés dans les conditions expérimentales.

4.3.3. Le cœur:

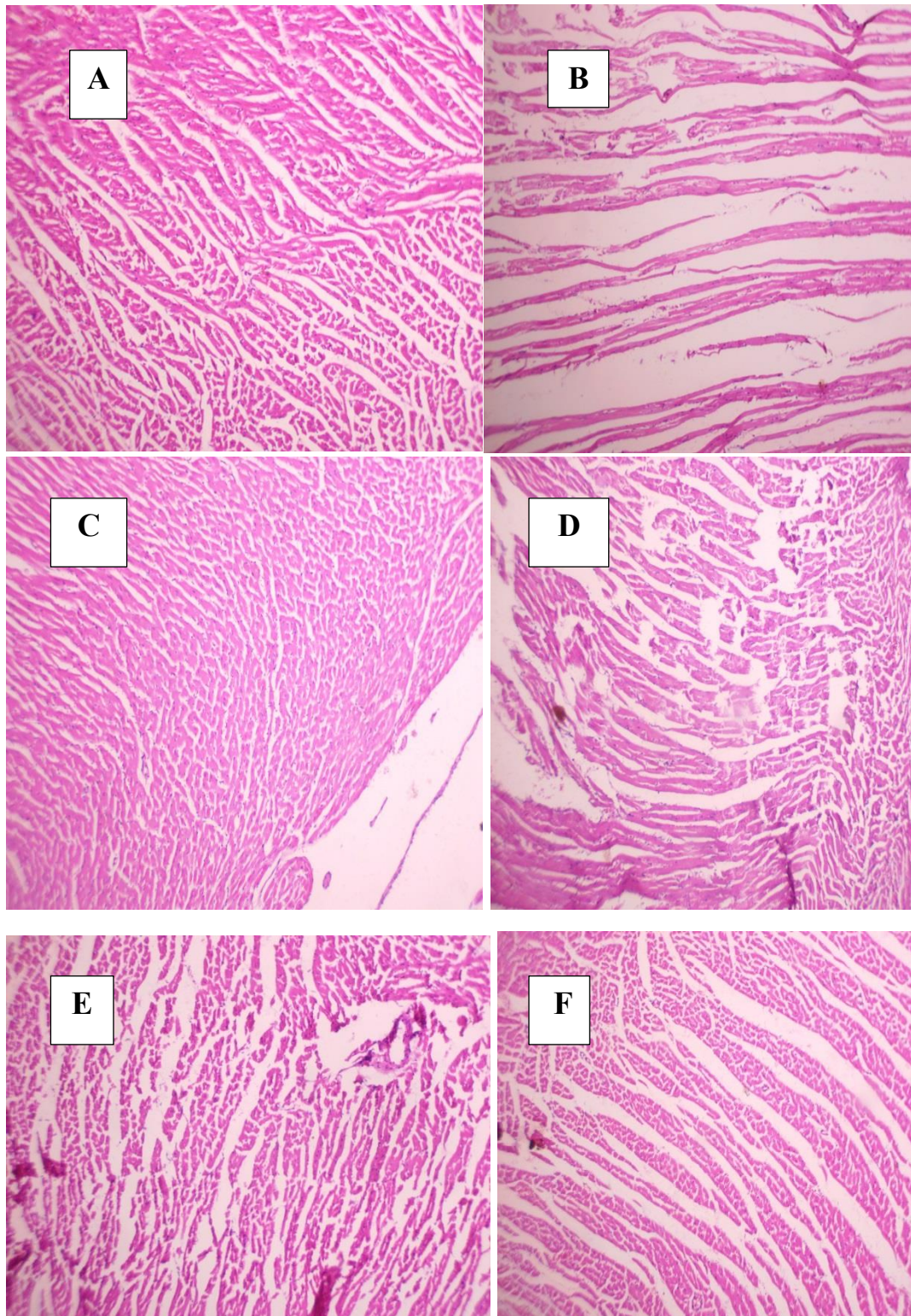


Figure 68: Examen microscopique du tissu cardiaque (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez les rats.

La préservation de la structure normale du tissu myocardique dans tous les groupes (A, B, C, D, E et F) concorde avec les résultats des analyses biochimiques précédentes, notamment ceux des marqueurs hépatiques tels que le TGO (ASAT), un indicateur non spécifique

pouvant refléter une lésion hépatique ou musculaire (y compris du myocarde). Bien que de légères élévations du TGO aient été observées dans les groupes de traitement combiné (en particulier D et E), l'absence de toute modification histologique cardiaque suggère que cette augmentation n'est pas due à une lésion cardiaque, mais provient plutôt du foie. Ceci est cohérent avec les résultats histologiques hépatiques, qui ont révélé une légère inflammation dans ces mêmes groupes. Sur le plan physiologique, le TGO est connu pour être distribué dans plusieurs tissus, notamment le foie, le cœur et les muscles ; par conséquent, l'interprétation de son élévation nécessite toujours une confirmation par des données histologiques. Dans cette étude, l'absence de toute modification structurelle du tissu cardiaque confirme que le cœur n'a pas été soumis à un stress pathologique suffisant pour provoquer une fuite enzymatique ou une lésion cellulaire. Ceci est corroboré par Libby P., qui a observé que les modifications cardiaques, tant histologiques qu'enzymatiques, n'apparaissent qu'en cas de stress sévère ou d'inflammation chronique.

De plus, l'impact potentiel des espèces réactives de l'oxygène (ERO), notamment dans les groupes C, D et E, ne s'est pas traduit par des modifications du tissu cardiaque, malgré son effet relatif sur certains indicateurs biochimiques. Cela suggère que l'intensité du stress oxydatif est restée inférieure au seuil susceptible d'induire des lésions cardiaques. Sies H. (2017) a démontré que l'effet du stress oxydatif varie selon le type de tissu et que certains tissus peuvent tolérer certains niveaux sans dommage structurel. Par ailleurs, la stabilité du tissu cardiaque dans tous les groupes, y compris D et E, renforce l'idée que les modifications biochimiques précédemment observées (telles qu'une élévation du TGO ou d'autres marqueurs) représentent des réponses fonctionnelles transitoires et non la preuve de lésions organiques. Ceci est conforme à l'importance accordée par l'Organisation mondiale de la Santé (2017) à l'interprétation des marqueurs biochimiques dans leur contexte histologique.

De plus, les résultats du groupe F (exposition indirecte), qui ont démontré une stabilité histologique et biochimique complète, confirment l'hypothèse selon laquelle la nature et l'intensité de l'exposition jouent un rôle crucial dans la détermination des effets biologiques, et que l'exposition indirecte a peu d'impact sur le cœur. Ainsi, la corrélation entre les résultats histologiques et biochimiques confirme que le cœur est resté fonctionnel et structurel, et que les variations observées au niveau des marqueurs enzymatiques ne reflètent pas une lésion cardiaque, mais sont principalement liées à d'autres organes, comme le foie. Ceci renforce l'innocuité globale des traitements étudiés sur le tissu cardiaque.

4.3.4. Le cerveau:

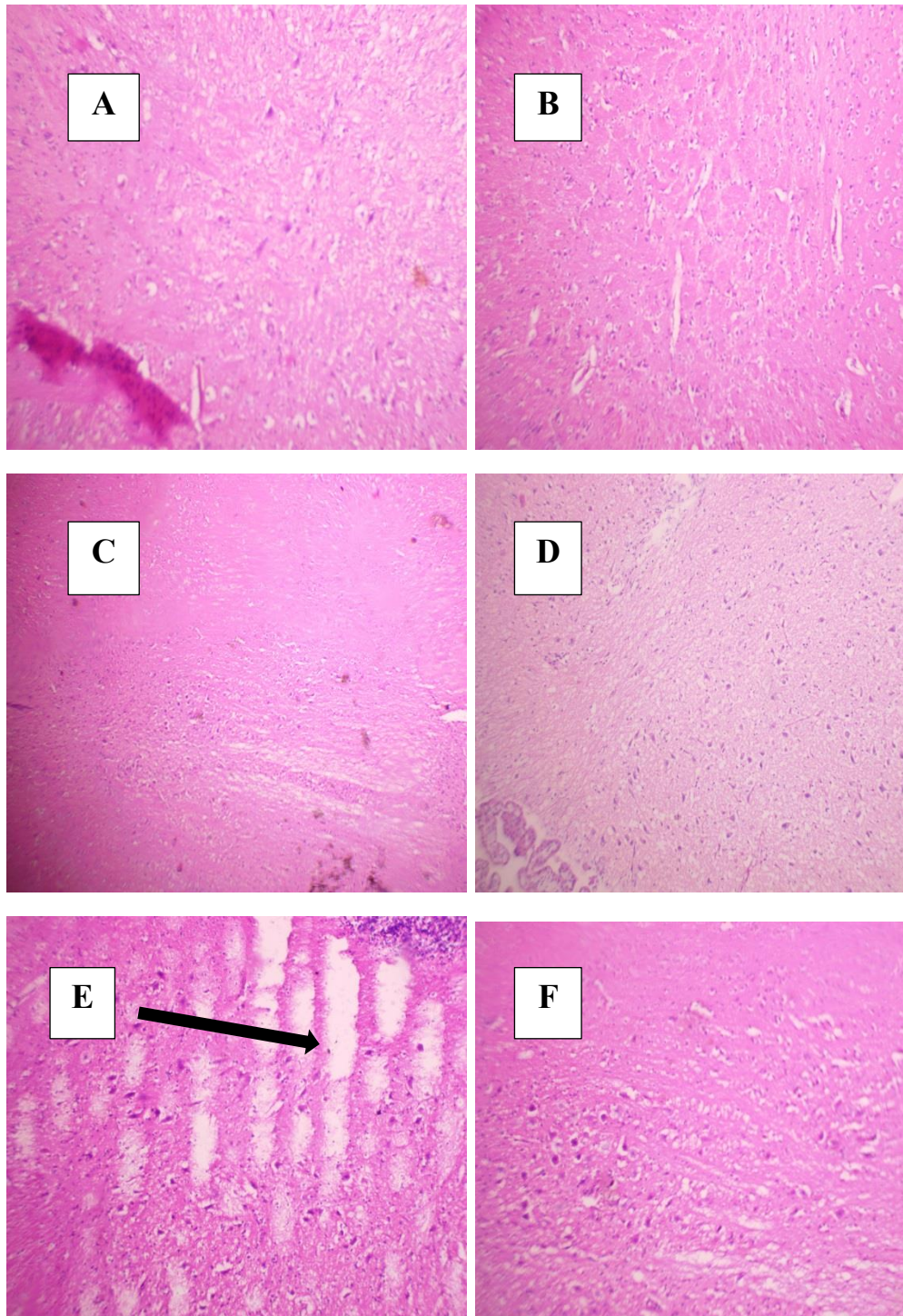


Figure 69: Examen microscopique de tissu cérébral (Grossissement $\times 100$) après coloration à l'hémaloxiline-éosine chez les rats .

Les résultats histologiques ont montré que la plupart des groupes (A, B, C, D et F) conservaient une structure cérébrale normale, similaire à celle du groupe témoin, ce qui indique l'intégrité du tissu nerveux et sa résistance aux différents traitements hydriques. En revanche, un léger œdème cérébral a été observé dans le groupe E (traité par plasma froid puis par magnétisation), une modification pathologique reflétant un déséquilibre hydrique au

niveau du tissu nerveux. Ce résultat peut s'expliquer par la grande sensibilité du cerveau au stress oxydatif. L'exposition séquentielle au plasma froid suivie d'une magnétisation peut altérer les propriétés physico-chimiques de l'eau, favorisant l'accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ERO). Ces molécules peuvent perturber la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (BHE), entraînant une fuite de liquide dans le tissu nerveux et le développement d'un œdème. Valko et al. (2007) ont indiqué que le stress oxydatif joue un rôle clé dans les perturbations au niveau de la membrane cellulaire, en particulier dans les tissus très sensibles comme le cerveau.

Ce résultat peut également être mis en relation avec des observations antérieures d'analyses biochimiques, notamment l'élévation relative de certains indicateurs tels que l'urée ou l'enzyme TGO dans certains groupes traités. L'élévation des taux de TGO n'est pas limitée au foie ; elle est également observée dans d'autres tissus, y compris le cerveau, et témoigne d'un stress cellulaire général ou de lésions cellulaires. Berg J. M. et al. (2002) ont démontré que l'augmentation des taux de cette enzyme dans le sang peut refléter des troubles multi-tissulaires, et pas seulement hépatiques. De plus, l'apparition d'œdème uniquement dans le groupe E suggère que la séquence de traitement (plasma suivi de magnétisation) joue un rôle crucial dans l'intensité de l'effet biologique. Cette séquence pourrait accroître la stabilité ou l'efficacité des molécules réactives dans l'eau, comparativement à d'autres traitements. Ceci concorde avec les résultats de Brisset J.-L. (2012) selon lesquels l'effet du plasma froid dépend fortement des conditions de traitement et des réactions subséquentes dans le milieu. En revanche, l'absence de modifications histologiques dans les autres groupes, y compris le groupe D (magnétisation suivie d'un traitement au plasma), confirme que l'effet observé n'est pas dû à chaque traitement pris individuellement, mais plutôt à la réaction combinée et à la séquence de leur application. De plus, l'absence d'effet dans le groupe F (exposition indirecte) appuie l'hypothèse selon laquelle l'intensité de l'exposition et la concentration des agents actifs n'ont pas atteint le niveau requis pour induire des modifications pathologiques cérébrales. Selon l'Organisation mondiale de la Santé (2016), l'apparition d'un œdème est un indicateur précoce de perturbation de l'homéostasie physiologique, mais n'implique pas nécessairement de lésions permanentes s'il est à un stade léger. Ces résultats suggèrent que les traitements physiologiques de l'eau sont relativement sûrs pour le tissu cérébral dans la plupart des cas. Cependant, la séquence Plasma → Magnétisation (groupe E) peut entraîner des effets légers sous forme d'œdème cérébral, potentiellement liés à une augmentation du stress oxydatif et à une altération de la barrière hémato-encéphalique, ce qui concorde avec les modifications biochimiques précédemment observées, notamment celles associées aux marqueurs de stress cellulaire.

4.3.5. Le peau:

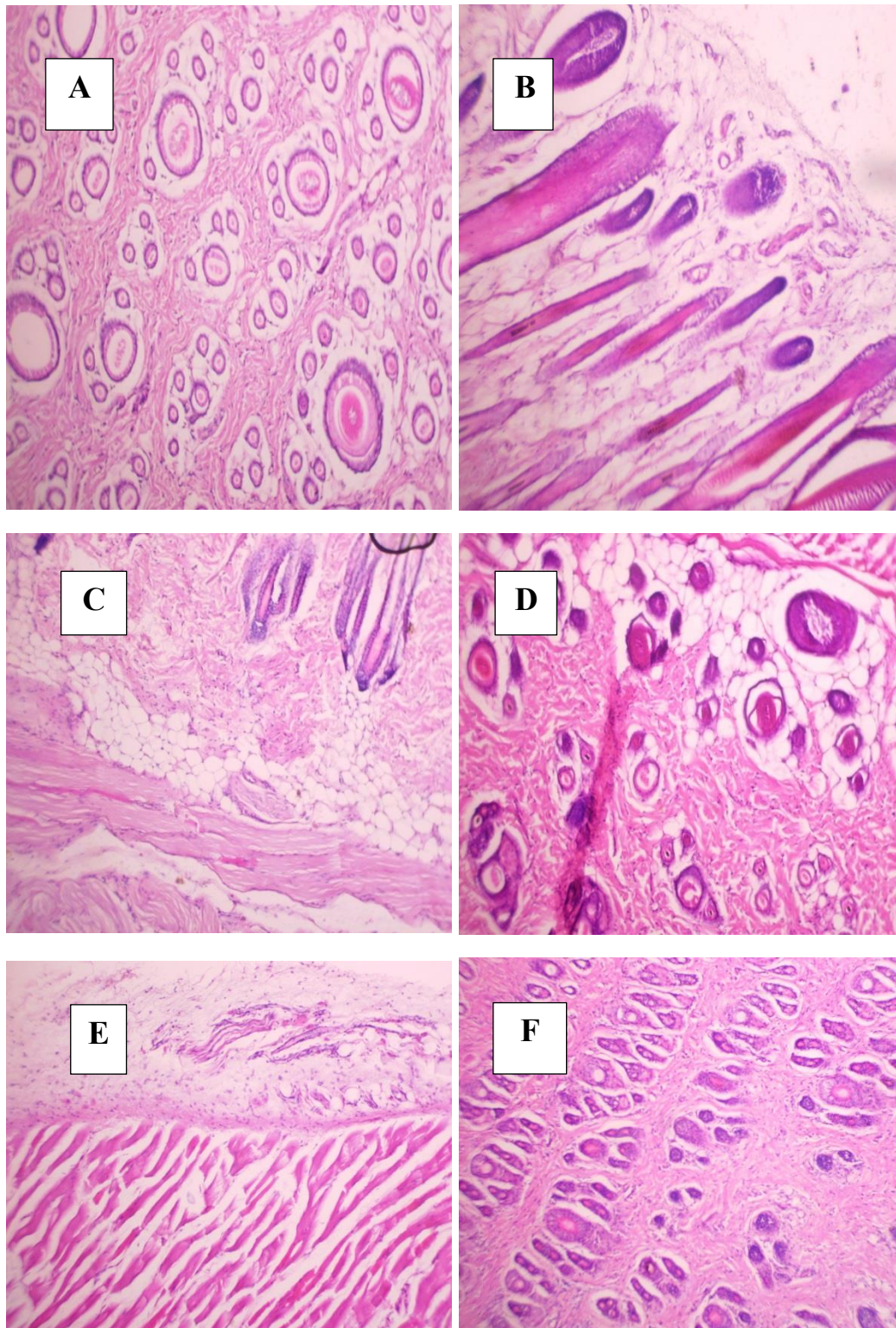


Figure 70: Examen microscopique de tissu cutané (grossissement 100x) après coloration à l'hématoxyline et à l'éosine chez les rats.

L'examen histologique de la peau a montré que tous les groupes expérimentaux (A, B, C, D, E et F) conservaient une structure normale similaire à celle du groupe témoin. L'épiderme et le derme sont restés intacts, sans signe d'inflammation, de dégénérescence ou de

perturbation cellulaire. Ces résultats indiquent que les différents traitements physiques à base d'eau, utilisés seuls ou en association, n'ont induit aucun effet histologique direct sur la peau dans les conditions expérimentales. Ce résultat s'explique par le fait que la peau constitue une barrière protectrice efficace contre les agressions extérieures et intérieures, grâce à sa structure stratifiée et à la présence de systèmes de défense antioxydants. Même en cas d'exposition indirecte aux espèces réactives de l'oxygène (ERO) résultant d'un traitement au plasma, ces espèces sont souvent modifiées ou neutralisées avant de pouvoir produire un effet histologique. Sies H. (2017) a noté que les cellules possèdent des mécanismes efficaces pour résister au stress oxydatif tant que celui-ci reste dans certaines limites.

De plus, l'absence de modifications, même dans les groupes D et E (traitements combinés), qui présentaient des perturbations biochimiques (telles qu'une légère augmentation de l'urée ou du TGO) selon des résultats antérieurs, indique que ces modifications étaient insuffisantes pour induire une réponse inflammatoire ou des lésions structurelles cutanées. Ceci est cohérent avec la nature indirecte de l'effet, l'agent causal n'atteignant la peau qu'après avoir traversé plusieurs étapes (absorption, distribution, métabolisme), ce qui en réduit l'intensité.

Lorsque ces résultats sont considérés conjointement avec les analyses biochimiques précédentes, il apparaît clairement que les modifications enregistrées pour certains indicateurs (tels que l'urée ou le TGO) reflètent des réponses fonctionnelles internes au niveau d'organes comme le foie et les reins, et ne s'étendent pas aux tissus périphériques comme la peau. Valko M. et al. (2007) ont démontré que l'effet du stress oxydatif est plus marqué dans les organes à forte activité métabolique (comme le foie) que dans les tissus à fonction barrière. De plus, la stabilité du tissu cutané dans le groupe F (exposition indirecte) confirme l'hypothèse selon laquelle l'intensité et la nature de l'exposition sont des facteurs déterminants des effets biologiques, et que l'exposition indirecte n'entraîne pas une accumulation suffisante des facteurs influents pour induire des modifications histologiques. Ceci concorde avec les conclusions de l'Organisation mondiale de la Santé (2017) selon lesquelles les effets environnementaux dépendent de la dose et de la durée d'exposition.

Par conséquent, on peut conclure que la stabilité de la structure du tissu cutané dans tous les groupes reflète l'absence d'effets toxiques systémiques s'étendant aux tissus périphériques, et que les modifications biochimiques précédemment observées restent limitées aux organes internes sans se traduire par des troubles du tissu cutané, confirmant ainsi la sécurité relative de ces traitements dans les conditions de l'étude.

4.4. Les résultats d'estimation des éléments minéraux:

4.4.1. Estimation du magnésium (Mg):

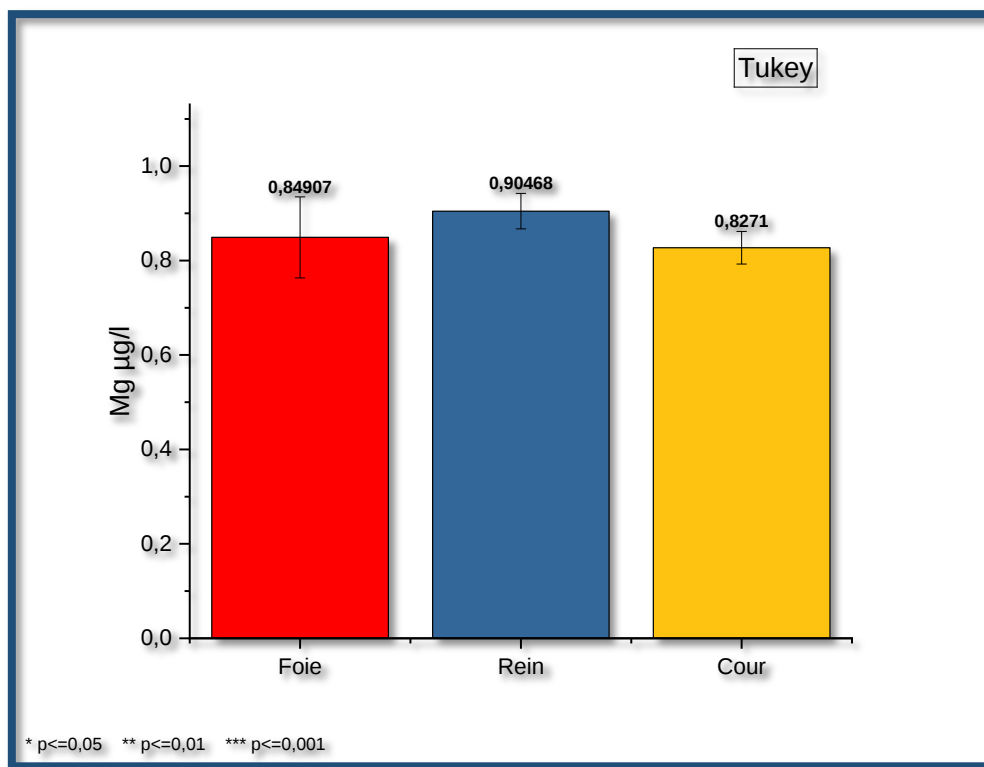


Figure 71: Cette figure présente la concentration moyenne de magnésium (Mg) dans le foie, les reins et le cœur.

Les résultats du dosage du magnésium présentent une corrélation nette avec les différents indicateurs précédemment analysés (enzymes hépatiques, fonction rénale, modifications histologiques et accumulation de fer), suggérant que la perturbation des taux de magnésium peut s'expliquer par un mécanisme central et unificateur, lié à l'équilibre minéral et au stress oxydatif.

Au niveau du stress oxydatif, toute diminution de la concentration de magnésium favorise la production de radicaux libres et affaiblit les systèmes antioxydants, ce qui concorde avec les explications antérieures concernant l'élévation de certains indicateurs, tels que le TGO (AST) ou l'urée, observée dans certains groupes. Ces variations reflètent un état de stress cellulaire, durant lequel le magnésium peut avoir été consommé comme facteur protecteur, expliquant ainsi sa diminution relative dans certains cas. Nielsen F. H. (2010) a indiqué qu'une carence en magnésium est directement associée à une augmentation du stress oxydatif et de l'inflammation. Lorsque les taux de magnésium étaient élevés, cela peut être lié aux modifications précédemment observées de la fonction rénale (urée et créatinine), le rein étant le principal organe responsable de la régulation de l'excrétion du magnésium. Par conséquent, toute perturbation fonctionnelle, même mineure, peut entraîner une diminution de l'excrétion et une augmentation de la concentration dans l'organisme, ce qui concorde avec l'accumulation de minéraux également observée au niveau rénal, notamment au niveau du fer.

Volpe S. L. (2013) a démontré que des taux élevés de magnésium sont souvent associés à une altération de l'excrétion rénale.

Concernant la fonction hépatique, le magnésium joue un rôle crucial dans la stabilisation des membranes cellulaires et la régulation de l'activité enzymatique ; ainsi, toute variation de sa concentration peut affecter l'intégrité des cellules hépatiques. Ceci est cohérent avec les modifications observées des enzymes hépatiques (TGO/TGP) dans certains groupes, modifications qui peuvent être considérées comme la conséquence d'une interaction combinée entre le stress oxydatif et un déséquilibre minéral. Rude R. K. (2012) a montré que le magnésium est essentiel au fonctionnement de centaines d'enzymes, en particulier celles impliquées dans le métabolisme et la production d'énergie. Au niveau cardiaque, le rôle du magnésium dans la régulation de l'activité électrique du myocarde en fait un élément essentiel au maintien de la stabilité fonctionnelle. Par conséquent, tout déséquilibre de ses concentrations, notamment une carence, peut accroître la sensibilité du cœur au stress oxydatif, ce qui corrobore les observations d'une accumulation accrue de fer dans cet organe, précédemment expliquée par une activité métabolique accrue. Cependant, l'absence de modifications histologiques nettes au niveau du cœur suggère que l'équilibre entre le magnésium et les agents oxydants n'a pas atteint le seuil de lésion structurelle.

Concernant les effets des traitements (magnétisation et plasma froid), des résultats antérieurs relatifs à l'accumulation de fer et aux modifications biochimiques confortent l'hypothèse selon laquelle ces traitements affectent la biodisponibilité des minéraux, dont le magnésium. Le traitement par plasma pourrait augmenter la production d'espèces réactives, tandis que la magnétisation pourrait modifier le comportement des ions dans l'eau, entraînant des altérations de l'absorption et de la distribution dans l'organisme. Brisset J.-L. (2012) et Pang X.-F. (2008) ont observé ces effets sur les propriétés chimiques et physiques de l'eau.

4.4.2. Estimation du fer (Fe):

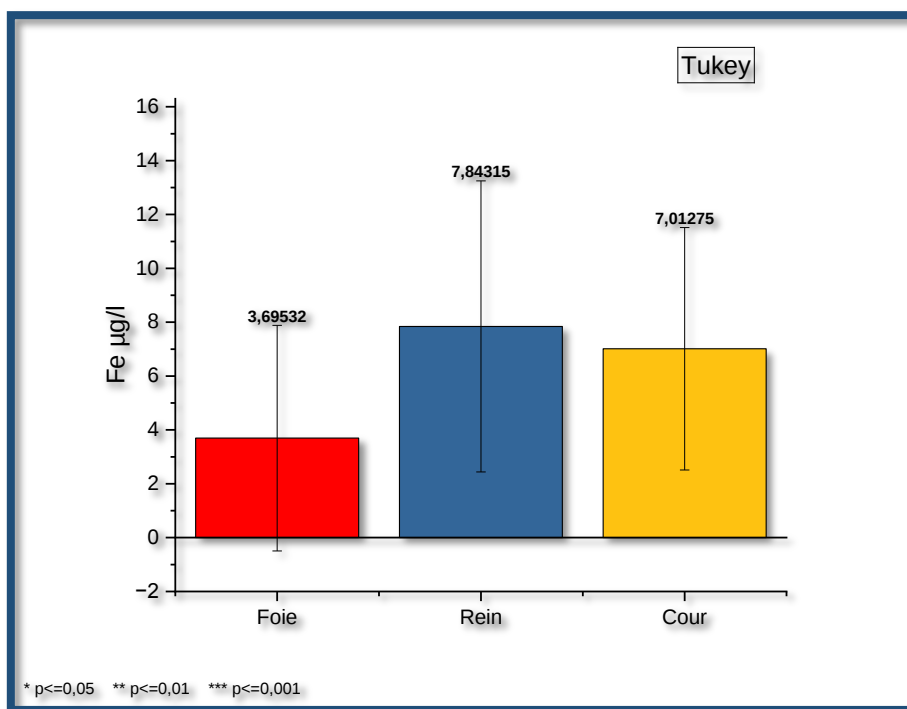


Figure 72: Cette figure présente la concentration moyenne en fer (Fe) dans le foie, les reins et le cœur.

Les résultats concernant la distribution du fer dans les organes (cœur, rein, foie) concordent parfaitement avec les modifications biochimiques et histologiques précédemment décrites. Cette variation de l'accumulation minérale peut s'expliquer par le stress oxydatif et la réponse fonctionnelle des organes vitaux. Au niveau cardiaque, les concentrations de fer les plus élevées enregistrées, notamment dans les groupes R4 et R1, confirment la sensibilité de cet organe au stress oxydatif, déjà évoquée, malgré l'absence de modifications histologiques évidentes. Organe fortement consommateur d'oxygène, le cœur offre un environnement idéal pour les réactions de Fenton induites par le fer, entraînant la production de radicaux libres. Cependant, l'absence de modifications histologiques indique que les dommages sont restés à un stade fonctionnel, sans atteindre le stade structural. Ceci est cohérent avec la stabilité des indicateurs histologiques, comparée aux légères variations observées pour certains indicateurs biochimiques, tels que le TGO (AST). Gutteridge J. M. C. et Halliwell B. (2018) ont montré que le fer libre est un catalyseur majeur de la production de radicaux libres dans les tissus à métabolisme intense. Au niveau rénal, l'accumulation élevée de fer concorde avec des analyses antérieures montrant des variations des taux d'urée et de créatinine dans certains groupes, indiquant un stress fonctionnel au niveau des reins. Organes responsables de la filtration et de l'excrétion, les reins sont plus susceptibles à l'accumulation de minéraux, notamment compte tenu des propriétés altérées de l'eau traitée. Cette accumulation peut contribuer à un stress oxydatif accru dans les tubules rénaux, ce qui pourrait expliquer les indicateurs fonctionnels relativement élevés en l'absence de modifications histologiques systématiquement évidentes. Valko et al. (2005) ont démontré que les métaux de transition

comme le fer jouent un double rôle dans les fonctions physiologiques et la toxicité oxydative . En revanche, le foie a présenté une variabilité significative des concentrations de fer, concordant avec les résultats histologiques et biochimiques antérieurs. Bien que le foie soit le principal organe de stockage du fer, il possède des mécanismes de régulation sophistiqués impliquant des protéines telles que la ferritine, lui permettant de moduler les taux de fer de manière endogène selon les besoins. Ceci explique les valeurs faibles, voire nulles, enregistrées dans certains cas, en particulier lors d'une réponse adaptative au stress oxydatif induit par les traitements (notamment le plasma froid). Cette variabilité est également cohérente avec les différents niveaux d'enzymes hépatiques (TGO/TGP), reflétant l'équilibre entre le stockage, la consommation et l'élimination du fer. Anderson G. J. et Frazer D. M. (2017) ont démontré que la régulation hépatique du fer dépend d'une interaction complexe entre le stockage et la réponse au stress cellulaire.

Pour le groupe R4 (magnétisation suivie de plasma), l'augmentation du fer observée concorde avec les effets biochimiques et histologiques plus marqués précédemment observés lors des traitements combinés. Cette séquence améliore probablement la biodisponibilité du fer ou modifie son comportement dans l'organisme, résultant de l'interaction entre les propriétés magnétiques et les effets oxydants du plasma. Ceci est cohérent avec les résultats de Brisset J.-L. (2012) concernant la capacité du plasma à modifier la composition chimique de l'eau, ainsi qu'avec ceux de Pang X.-F. (2008) concernant l'effet de la magnétisation sur les propriétés physiques des solutions.

Enfin, le coefficient de variation élevé (RSD) observé lors des analyses précédentes confirme la même tendance, à savoir une différence de réponse entre les groupes. Ceci confirme que les effets ne sont pas uniformes, mais dépendent plutôt de l'interaction entre le type de traitement, sa séquence et les caractéristiques physiologiques de chaque organe. Miller J. N. et Miller J. C. (2018) ont noté que ce type de variation est fréquent dans les mesures biologiques et reflète l'interaction de facteurs analytiques et biologiques.

4.4.3. Estimation du calcium (Ca):

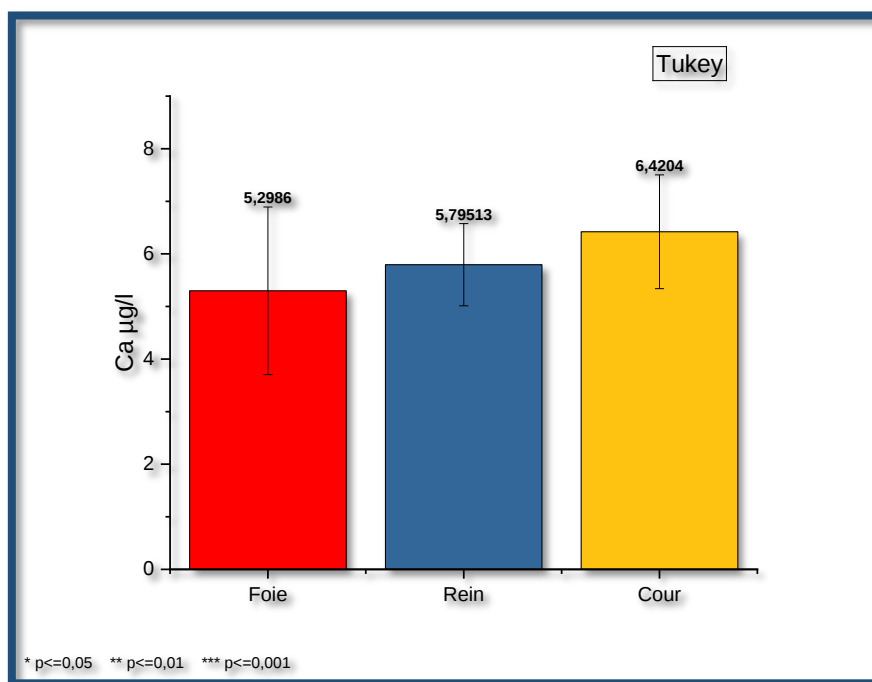


Figure 73: Cette figure présente la concentration moyenne de calcium (Ca) dans le foie, les reins et le cœur.

Les résultats relatifs au calcium présentent une corrélation claire avec les variations précédemment enregistrées du magnésium (Mg) et du fer (Fe), ainsi qu'avec les indicateurs biochimiques (enzymes hépatiques, urée, créatinine) et les modifications histologiques. Cette discordance peut s'expliquer dans le contexte de l'équilibre ionique et du stress oxydatif. L'augmentation significative du calcium, particulièrement dans le groupe C, peut être attribuée à l'effet du traitement par plasma froid, qui accroît la disponibilité des ions dans l'eau. Cette augmentation peut entraîner une perturbation de l'équilibre minéral, notamment du magnésium, compte tenu de la compétition entre le Ca et le Mg au niveau de l'absorption cellulaire. Ainsi, l'augmentation du Ca peut contribuer à une diminution du Mg ou à son dysfonctionnement, ce qui concorde avec les explications antérieures liant une carence en magnésium à un stress oxydatif accru. Nielsen F. H. (2010) a indiqué qu'un déséquilibre en magnésium est associé à une inflammation et un stress oxydatif accru.

Par ailleurs, la relation entre le calcium et le fer est un facteur important dans l'interprétation des résultats, car une hypercalcémie peut affecter l'absorption et la biodisponibilité du fer. Cependant, lorsque les deux sont simultanément élevés (comme dans certains groupes), cela reflète un effet direct des traitements sur l'augmentation de la biodisponibilité des minéraux, ce qui accroît le risque de stress oxydatif. Le fer contribue à la production de radicaux libres, tandis qu'une hypercalcémie peut induire des voies cellulaires associées à la mort cellulaire ou à la perturbation de la signalisation cellulaire. Gutteridge et Halliwell (2018) ont démontré que l'interférence des métaux de transition avec l'équilibre ionique amplifie les effets oxydatifs intracellulaires. Au niveau rénal, l'hypercalcémie est un facteur important qui pourrait expliquer les modifications précédemment observées de l'urée

et de la créatinine, car un excès de calcium peut entraîner une augmentation de la charge de filtration et du risque de précipitation, affectant ainsi la fonction rénale. Ceci est cohérent avec les interprétations antérieures d'un stress fonctionnel rénal dans certains groupes, notamment ceux traités. Soetan K. O. (2010) a montré que des taux élevés de calcium peuvent altérer la fonction rénale lorsqu'ils dépassent les limites physiologiques.

Au niveau du foie, les déséquilibres calciques peuvent affecter l'activité enzymatique intracellulaire, expliquant les modifications observées des enzymes TGO/TGP. Le calcium joue un rôle dans la régulation de la signalisation cellulaire, et toute augmentation excessive peut activer des voies inflammatoires ou dégénératives, complétant ainsi les modifications histologiques et fonctionnelles précédemment rapportées. Concernant le cœur, le calcium est essentiel à la régulation de la contraction musculaire ; par conséquent, des taux élevés peuvent affecter l'activité cardiaque. Lorsque cela est associé à des taux élevés de fer dans le cœur, un double effet (Ca + Fe) peut être observé, augmentant la sensibilité du tissu cardiaque au stress oxydatif, bien qu'aucune modification histologique manifeste n'ait été détectée, indiquant que l'effet restait d'ordre fonctionnel.

Enfin, la variation au sein d'un même groupe (par exemple, F3 et F4) est cohérente avec les observations précédentes dans les autres analyses (Mg, Fe), reflétant les différences de réponses biologiques individuelles et l'interaction entre le type et la séquence du traitement. L'Organisation mondiale de la santé (2017) a confirmé que la concentration de calcium dans l'eau est significativement affectée par différentes méthodes de traitement, ce qui a un impact sur l'équilibre minéral de l'organisme.

Conclusion générale

Conclusion:

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'évaluation de l'impact des traitements physiques de l'eau, notamment la magnétisation et le plasma froid, utilisés seuls ou en combinaison, sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et leurs implications biologiques. La partie théorique a démontré que la magnétisation affecte la structure moléculaire de l'eau et le comportement des ions dissous, tandis que le plasma froid génère des espèces réactives capables d'induire des modifications chimiques actives. Ceci suggère un potentiel d'effets biologiques complexes lorsque ces deux techniques sont combinées.

Partant de ce constat, la partie appliquée s'est concentrée sur l'étude des effets de deux combinaisons de traitements différentes : plasma froid suivi de magnétisation, et magnétisation suivie de plasma froid, afin d'évaluer la nature de leur interaction synergique. Cependant, les résultats obtenus ont révélé des effets biologiques négatifs qui justifient des investigations complémentaires.

Les analyses histologiques ont révélé un œdème cérébral marqué chez les souris ayant consommé de l'eau traitée d'abord au plasma froid puis magnétisée, suggérant une possible perturbation de l'équilibre osmotique ou une augmentation de la perméabilité vasculaire due à l'accumulation d'espèces réactives ou à des modifications de la composition chimique de l'eau. Cet effet est probablement lié au stress oxydatif induit par des espèces réactives insuffisamment stabilisées ou modifiées lors de la phase de magnétisation ultérieure.

À l'inverse, une légère inflammation hépatique a été observée aussi bien chez les souris ayant consommé de l'eau traitée par magnétisation puis par plasma froid que chez celles ayant subi le traitement inverse (plasma puis magnétisation). Ceci reflète la grande sensibilité du foie à toute modification de son environnement interne, notamment en présence de composés réactifs ou de variations de l'équilibre minéral, susceptibles de déclencher une réponse inflammatoire comme mécanisme de défense.

Ces résultats indiquent qu'un double traitement n'entraîne pas nécessairement un effet synergique positif et peut, dans certains cas, induire des effets indésirables dus à une interaction complexe entre les modifications physico-chimiques. Il est également évident que l'ordre des traitements joue un rôle crucial dans la nature de l'impact biologique, les variations observées dans cet ordre ayant conduit à des différences de type et d'intensité des effets enregistrés.

Par conséquent, cette étude souligne l'importance d'aborder les techniques de traitement physique de l'eau avec prudence, en particulier lorsqu'elles sont combinées, car leur innocuité biologique ne peut être présumée sans une évaluation expérimentale rigoureuse. Les résultats soulignent également la nécessité d'études approfondies pour comprendre les mécanismes moléculaires sous-jacents à ces effets, en se concentrant sur le rôle du stress oxydatif et de l'équilibre ionique, et pour déterminer les conditions optimales d'utilisation sans danger.

En conclusion, il convient de souligner que le double traitement de l'eau, malgré son potentiel théorique, peut engendrer des effets biologiques néfastes si ses paramètres ne sont pas contrôlés avec précision. Des recherches supplémentaires sont donc indispensables pour

Conclusion générale

perfectionner ces techniques et orienter leur utilisation vers des applications sûres et efficaces.

Références

Références:

1. Abdel Nebi, A. K. (2017). L'effet de l'eau magnétisée sur trois cultures (orge, fève et abricot). Mémoire de fin d'études.
2. AgroParisTech. (2013). Régulation du métabolisme secondaire de l'arginine et de l'acide alpha-linolénique : implication dans la physiopathologie du syndrome métabolique.
3. Ahmed, A. S., Elshikh, M. M. Y., Eleman, W. E., et al. (2023). Influence of mining water magnetization method on the performance of silica fume concrete. Buildings, 13.(1)
4. Al Ansari, M. S. (2023). Water purification under magnetization method: A review.
5. Al-Safy, R. A. (2011). Employment of magnetic water treatment in construction. Journal of Engineering and Sustainable Development, 25, 1–13.
6. Belkhir, M; et al (2012). Etude d'un réacteur à décharge plasma pour la décontamination de surface. Mémoire de fin d'étuds. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
7. Bensaad, S. (2024). Le cycle de Krebs. Cours. Université de Constantine 3.
8. Benmohamed, S. (2020). Les glucides, lipides et acides aminés.
9. Bontanil, A. (2018). Contribution à l'étude de la culture du blé tendre sous traitement magnétique.
10. Boutaghane, H., et al. (2018). Contamination par les nitrates des eaux souterraines en milieu aride : cas de la région d'Oued Righ (Algérie).
11. Bouselsal, B., & Djemai, A. (2017). Évaluation de la qualité des eaux souterraines en zone aride.
12. Brisset, J. L., & Hnatiuc, E. (2012). Perception of plasma-liquid interactions and their applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 32(4), 655–674.
13. Cancer.fr. (2018). Les champs magnétiques et facteurs de risque.
14. CIE. (2005). L'histoire de l'eau.
15. Cometre. (2019). Utilization of magnetic water in cementitious adhesive.
16. <http://dardel.info/eau-composition.html>. Consulter le 23-01-2026 (19:31)
17. Duffus, J. H., Nordberg, M., & Templeton, D. M. (2007). Glossaire des termes utilisés en toxicologie.
18. <http://www.ecomologie.com/propriétés-physiques-chimiques-d-eau>. Consulter le 24-01-2026 (23:23)
19. Fathi, A., Mohamed, T., & Hussein, M. (2006). The effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation. Desalination, 206(1–3), 136–146.
20. Flash ,X;(2012). Article.Les plasmas. La lettre scientifique de l'école polytechnique N°12
21. Futura Sciences. Le cycle de l'eau et développement durable.
22. Geological Survey. Measurement of pH.
23. Hella Water. (2025). Traitement magnétique de l'eau et productivité agricole.
24. IPAG Grenoble. Le champ magnétique.
25. Karthik, D. E., Mrudunayani, P., & Ronda Babu, S. V. V. Influence of magnetic water on self-compacting concrete.

26. Kherici, N. (2009). Hydrogéologie du système aquifère du Sahara nord-occidental.
27. Khodja. La chaîne respiratoire.
28. King, S., Wong, N. S., et al. (2023). Plasma-activated water.
29. Klaassen, C. D. (2019). Toxicologie de Casarett et Doull.
30. Layachi, G. (2023). Effect of magnetic treatment water on cement-based materials.
31. Maisan, M., & Pelletier, J. (2006). Physique des plasmas collisionnels et applications.
32. Mezonaghi, H. (2018). Effet de l'eau sur les propriétés du blé.
33. Mouline, C. (2020). Analyse du cycle cellulaire et voies métaboliques du cancer.
34. Nan, S., & Wang, C. F. (2003). Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete.
35. Pang, X., & Deng, B. (2008). Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field.
36. Pascal Ferré.(2002). Métabolisme: la renaissance.Article. Centre de recherche des cordeliers unité inserm1138,Sobonne université, Université de Paris 15rue de l'école de médecine.
37. Paul, R. (2015). Functional finishes for textiles.Woodhead Publishing.
<https://www.sciencedirect.com> Consulter 10-04-2026(٢١:٥٢)
38. [http:// Savree.com/Fr/encyclopedie/](http://Savree.com/Fr/encyclopedie/) point-débullition. Consulter le 24-01-2026(٠١:١٨)
39. Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2021). Caractéristiques hydrogéochimiques.
40. Shibamoto, T., & Bjeldanes, L. F. (2009). Introduction à la toxicologie alimentaire.
41. Smith, R., Johnson, L., & Williams, P. (2003). Magnetic treatment of water and its effects on scale prevention.
42. Soetan, K. O., Olaiya, C. O., & Oyewole, O. E. (2010). The importance of mineral elements.
43. Sunway University.(٢٠٢٢) .
44. SUEZ Water Handbook. Propriétés de l'eau.
45. Techniques de l'Ingénieur. Propriétés biologiques de l'eau.
46. Timbrell, J. (2009). Principes de toxicologie biochimique.
47. TME. Champ magnétique linéaire.
48. Université de Montréal. Régulation énergétique et Parkinson.
49. Université de Rennes 1. (2015). Synthèse des protéines.
50. Walker, C. H., Sibly, R. M., Hopkin, S. P., & Peakall, D. B. (2012). Principes d'écotoxicologie.
51. World Health Organization (WHO). (2011). Directives relatives à la qualité de l'eau de boisson.
52. World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.).
53. World Health Organization (WHO). (2020). Principes d'évaluation des risques chimiques.
54. Yakhlef, G. (2021). Corrélations entre les différents métabolismes.
55. Yakhlef, G. (2023). Régulation du métabolisme glucidique.
56. Zoviad, F. (2023). Étude des charges dans les plasmas de décharge.