

Les Postes d'Electrophysiologie

Conception, montage, câblage



Principes et applications

Préface de Pierre MEYRAND
Directeur de Recherche – CNRS -

Pierre CIRET
I.E. Electronicien - CNRS
Place Peyneau
33120 Arcachon
Tél.: 05 56 22 39 23
E-mail: p.ciret@epoc.u-bordeaux1.fr
2001

PREFACE :

Tout au long du XX^{ème} siècle, les progrès de la biologie ont été fulgurants et remarquables. Ils ont profondément modifié notre façon d'appréhender le monde et les êtres. Ces progrès brillants ont été possibles grâce aux perfectionnements et au développement de différentes techniques permettant d'explorer le vivant sous toutes ces facettes. Parmi ces techniques, l'électrophysiologie a largement contribué à l'exploration et à la compréhension de nombreuses fonctions, dont la fonction nerveuse.

Dans le système nerveux, des myriades de cellules génèrent des micro-signaux électriques qui sont une des manifestations de leurs activités, et qui sont impliqués dans la communication intercellulaire. Un des buts des chercheurs, utilisant les techniques d'électrophysiologie, est de recueillir ces signaux biologiques, de les amplifier afin de pouvoir les visualiser, et enfin de les corrélés à une fonction cellulaire donnée et/ou de les manipuler afin d'en comprendre la signification biologique. Cependant, lorsque l'on s'adresse à des signaux de l'ordre du microvolt ou du picoampère, avec par exemple l'enregistrement de courants générés par la diffusion d'ions au travers d'une unique protéine canal, les difficultés techniques pour amplifier sélectivement de tels signaux sont telles, qu'il est indispensable de collaborer étroitement avec les électroniciens. Ces derniers connaissent toutes les subtilités pour amplifier des signaux infimes et pour chasser, en utilisant de puissants filtres ou d'autres ingénieux procédés, le fameux « 50 Hz » ennemi juré des électrophysiologistes.

Cet opuscule est la synthèse de l'art électrophysiologique appliqué à l'étude du système nerveux. Pierre CIRET, qui a servi et éduqué avec brio plusieurs générations d'électrophysiologistes dans le laboratoire du Pr. Maurice Moulins, a réalisé combien il était difficile pour eux de créer leur propre poste d'électrophysiologie après avoir quitté le laboratoire et c'est afin de les aider dans cette tâche qu'il a réalisé cette brochure.

L'objectif premier de ce mémoire est de donner les astuces et les ficelles qui permettront à tout électrophysiologiste de rapidement résoudre les problèmes d'élaboration et de maintenance d'un poste d'électrophysiologie plutôt que de développer les principes électroniques liés à ce type de matériel.

Ce manuel est fondé sur une longue expérience et un enthousiasme sans faille à faire progresser les postes d'électrophysiologie. Je ne doute pas que cet opuscule aidera un grand nombre d'électrophysiologistes dans la réalisation de leur poste d'expérimentation, et je souhaite qu'il puisse entraîner de jeunes chercheurs à utiliser cette merveilleuse technique qui permet de suivre en direct l'activité du système nerveux, qui a tant apporté à sa connaissance et qui restera un outil indispensable à son étude.

Talence le 22 février 2001
Pierre MEYRAND
DR CNRS

Ce fascicule récapitule les règles d'agencement, de montage et de câblage utilisées pour les différents postes d'électrophysiologie que j'ai monté et fait évoluer durant les 20 dernières années.

Il est destiné à un double public :

les électrophysiologistes trouveront les conseils nécessaires à la conception et l'entretien de leur poste d'expérimentation,

les électroniciens trouveront les règles de l'art électronique, spécifiques à l'électrophysiologie.

Au lieu de présenter des solutions ou des applications types, je me suis plutôt attaché, dans un souci didactique, à décrire la nature des risques et les règles générales de compatibilité électromagnétique applicables dans ce domaine.

Ce mémoire est bâti de façon linéaire : il est nécessaire de le lire une première fois dans son intégralité. Par la suite, il pourra servir de référence ponctuelle, notamment grâce aux schémas et annexes présentés à la fin.

PREAMBULE

Ayant officié en tant qu'électronicien pendant 21 ans, de 1978 à 1999, dans des laboratoires de Neurobiologie (Laboratoires de Neurobiologie Comparée, puis de Neurobiologie et Physiologie Comparées URA 1126 à Arcachon et enfin de Neurobiologie des Réseaux, UMR 5816 à Talence), j'ai été amené à monter et faire évoluer des postes d'électrophysiologie multidisciplinaires.

Ceux-ci juxtaposent des chaînes de mesures de potentiels extra-cellulaires, intra-cellulaires et de stimulation ; de configuration et de nombre de voies variables.

L'évolution des recherches menées dans ces laboratoires successifs a nécessité du matériel d'enregistrement de plus en plus performant.

Je voudrais citer le cas des amplificateurs extra-cellulaires que j'ai mis au point et améliorés tout au long de ces années. Les études in vivo du système stomatogastrique du homard puis celles sur son développement ont fourni un « terrain d'essai » draconien mais très profitable pour l'électronicien responsable de la conception de ces amplificateurs : ambiance électromagnétique très parasitante d'un côté, ou signaux extrêmement petits de l'autre ! Il en a découlé, un peu par la force des choses, une optimisation progressive et très poussée des performances de ce matériel.

A ce jour, j'ai réalisé, au total, plus d'une cinquantaine d'amplificateurs extra-cellulaires. Leur niveau de performances (notamment le très faible bruit de fond) a autorisé des enregistrements sur de très petits nerfs et muscles (20 à 30 μm) d'embryons de homard à un stade de développement peu avancé. En électromyographie, sur le système stomatogastrique du homard, des enregistrements chroniques in vivo (pour des périodes allant jusqu'à 3 mois) ont été régulièrement réalisés sur des muscles d'un diamètre inférieur à un mm.

Les chercheurs estiment que les performances de ces amplificateurs égalent les meilleurs modèles du commerce (par exemple le GRASS P511J) pour un coût 4 à 6 fois moindre. Ils sont aujourd'hui utilisés dans différents laboratoires (UMR 5816, CNRS, Talence; UMR 5807, CNRS, Talence; INSERM U378, Bordeaux II; INSERM U261 Institut Pasteur, Paris; UPR9011, CNRS, Marseille) et ont été mentionnés, depuis 1991, dans plus de 15 publications du laboratoire.

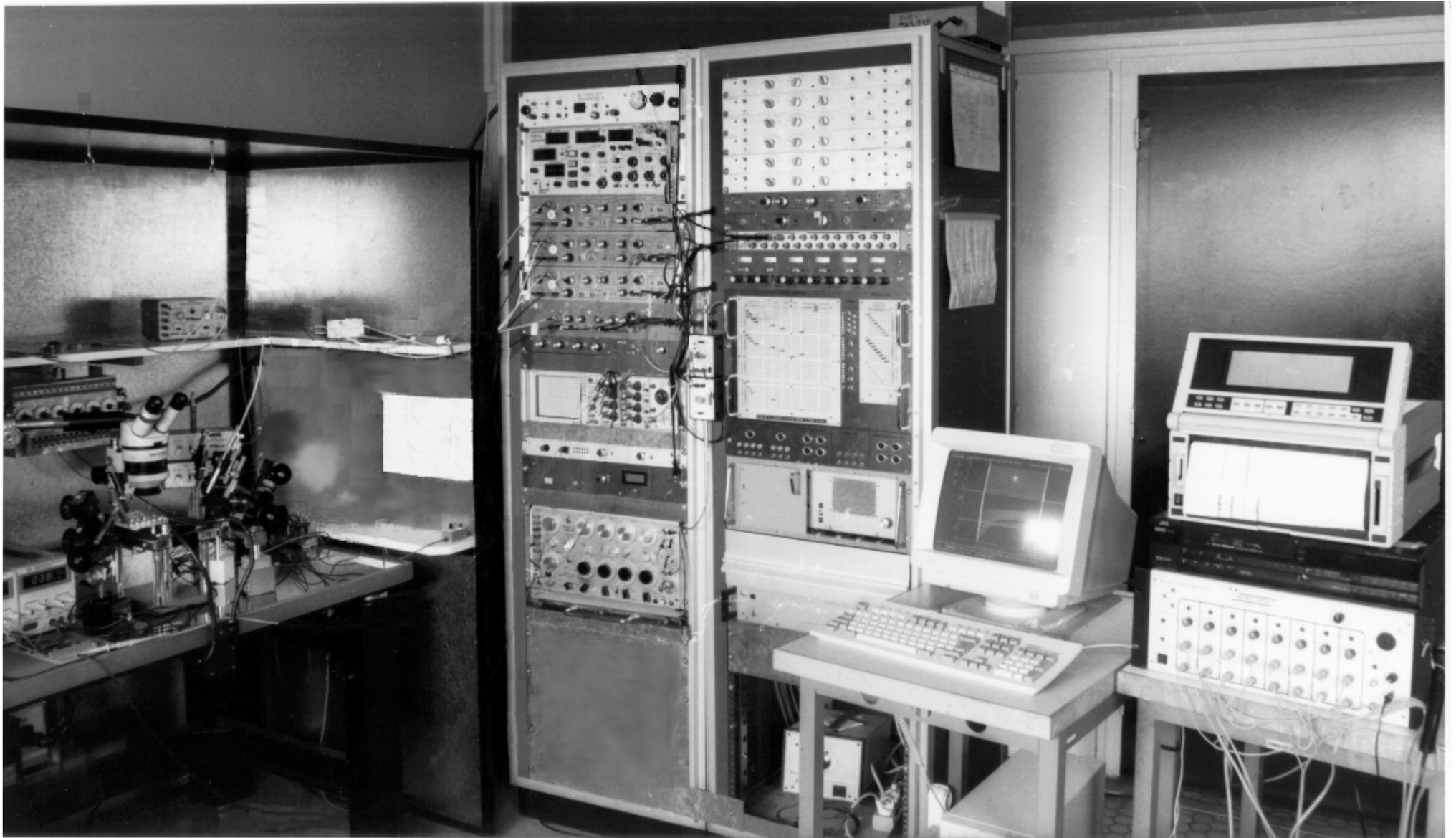
A la demande de l'Association des Professeurs du Second Degré, j'ai étudié une version simplifiée (à faible coût) et adaptée aux besoins de l'enseignement dans les lycées. (utilisée à l'Université. P. Sabatier, lab. de Zoologie, M. Y. CROUAU, Ecologie des Invertébrés Terrestres, Toulouse).

La dernière version de ces amplificateurs intègre dans un seul ensemble, six voies d'amplification extra-cellulaire et bénéficie de toutes les performances acquises au fil des années, notamment le bruit de fond très faible et la forte réjection des parasites de mode commun. L'utilisation de nouvelles techniques de C.A.O. a, de plus, amélioré la reproductibilité et, par voie de conséquence, encore abaissé très sensiblement le coût final.

SOMMAIRE

Pages :

1- PRESENTATION.....	7
2- LES RISQUES :.....	8
2-1: PRINCIPES.....	8
2-1-1 : <i>Le champ électrique</i>	8
2-1-2 : <i>Le champ magnétique</i>	8
2-2: ENUMERATION DES RISQUES.....	11
3- LES SOLUTIONS:.....	14
3-1: INTRODUCTION.....	14
3-2: PRINCIPE:.....	14
3-3: L'IMPLANTATION:.....	15
3-4: L'AGENCEMENT.....	16
3-4-1 <i>Les baies d'instrumentation:</i>	19
3-4-2 <i>La cage de Faraday:</i>	22
3-5: LE CABLAGE.....	22
3-5-1 <i>Câblage côté signaux forts</i>	22
3-5-2 <i>câblage côté signaux faibles</i>	24
3-6: L'ELECTRODE DE REFERENCE.....	34
4- APPLICATION : SCHEMA D'APPLICATION POUR LES POSTES DU LABORATOIRE.....	36
5- RECHERCHE DES PANNES.....	40
6- CONCLUSION.....	43
ANNEXE 1 : ALIMENTATION ELECTRIQUE ET ELECTROPHYSIOLOGIE.....	44



Préparation biologique
dans la cage de Faraday

Baies d'instrumentation

Systèmes d'enregistrement

1- Présentation

Les postes d'électrophysiologie classiquement utilisés dans le laboratoire comportent une cage de Faraday abritant la préparation et son environnement et une ou deux baies d'instrumentation recevant les appareils au standard 19 pouces. (On appelle « baies d'instrumentation », ou « racks » les armoires métalliques industrielles conçues pour supporter des appareils dits « rackables »).

Fonctionnellement, ils se composent de:

- une chaîne de mesure de potentiels intra-cellulaires.

Comportant de une à cinq voies, il s'agit d'électromètres simples (WPI), de voltage-clamp ou patch-clamp (AXOCLAMP), suivis d'interfaces d'amplification différentiels et de compensation DC (fabriqués dans le laboratoire).

- une chaîne de mesure de potentiels extra-cellulaires.

Ce sont des amplificateurs différentiels extra-cellulaires (fab. Labo.), en général au nombre de 6. Leurs performances ont été optimisées pour les trois types d'électrodes utilisés dans le laboratoire :

Les électrodes bipolaires en fil de platine pour les préparations *in vitro*.

Les électrodes de succion (faites maison) pour les préparations *in vitro*.

Les électrodes en fil d'argent gainées de Téflon pour l'électromyographie *in vivo*.

Sur certains postes, ces amplificateurs sont précédés d'une boîte d'aiguillage de 16 électrodes vers 6 amplificateurs. Celle-ci permet également le basculement des électrodes vers une voie de stimulation.

- Un stimulateur avec un aiguillage de stimulation et des unités d'isolation

- Les systèmes d'affichage et de sorties:

Oscilloscope à mémoire

Audio (écoute sur haut-parleur)

Enregistreur magnétique

Enregistreur graphique

Acquisition informatique

- Une plaque d'aiguillage:

souvent modèle matriciel à microfiches jacks, permettant le brassage de tous les signaux vers les systèmes d'affichage et de sorties.

2- les risques :

2-1: Principes

Comme dans toute mesure, il y a risque d'erreur. En dehors des limites normales fixées par les performances des amplificateurs intra ou extra-cellulaires (bruit de fond, résolution), des signaux parasites peuvent se superposer, s'ajouter aux signaux mesurés. Ils dégradent le rapport signal / bruit et donc la précision, la résolution de la mesure. Les informations inférieures au niveau du bruit seront masquées, noyées par celui-ci.

La plupart des signaux parasites rencontrés sont issus de l'alimentation électrique. Le secteur, à 50 Hz en France, 60 Hz aux Etats Unis, est omniprésent. Nous vivons tous baignés dans du 50 Hz!

En plus de pouvoir circuler le long des câbles **par conduction**, les signaux parasites ont deux moyens de propagation que l'on pourrait qualifier d'aérien: **le champ électrique et le champ magnétique**.

2-1-1 :Le champ électrique

Le champ électrique est généré par tout conducteur sous tension (même si aucun courant n'y circule). Son amplitude croît avec la valeur de la tension (en volt). Il se propage dans l'air et décroît suivant la distance par rapport à la source. **Il est arrêté par un écran de Faraday** (écran conducteur relié à la masse). Si l'écran était parfaitement étanche, ce qui serait par exemple le cas d'une cage de Faraday sans aucune ouverture, le blocage du champ électrique serait parfait à 100%, quel que soit l'épaisseur de l'écran pourvu qu'il soit conducteur.

L'effet du champ électrique est de produire une tension dans tout conducteur "antenne" baigné par ce champ. Plus le conducteur "antenne" aura une impédance élevée par rapport à la masse, mieux il captera. Inversement, plus son impédance sera basse, plus il se rapprochera du cas de l'écran de Faraday relié à la masse, moins il captera.

2-1-2 : Le champ magnétique

Le champ magnétique est généré par tout conducteur traversé par un courant électrique. Son amplitude croît avec l'intensité du courant (en ampère). Il se propage dans l'air et décroît suivant la distance par rapport à la source. **Il n'est pas arrêté par un écran de Faraday**. Seuls certains

métaux, sous de fortes épaisseurs, peuvent atténuer un champ magnétique: le plomb ou le Mumétal (alliage Ni/Fe/Cu/Mo). Souvent, la seule parade sera donc l'éloignement par rapport à la source.

L'effet du champ magnétique est d'induire une tension aux bornes de tout conducteur baigné dans ce champ. C'est l'induction magnétique: la tension sera de même fréquence, et d'amplitude proportionnelle à l'intensité du champ magnétique. C'est le même principe que dans un transformateur. Le courant qui traverse le bobinage primaire crée un champ magnétique dans le transformateur. Le bobinage secondaire, soumis à l'induction magnétique produite par le primaire, génère un courant électrique.

Les champs magnétiques sont particulièrement perturbant en présence de boucles de masses :

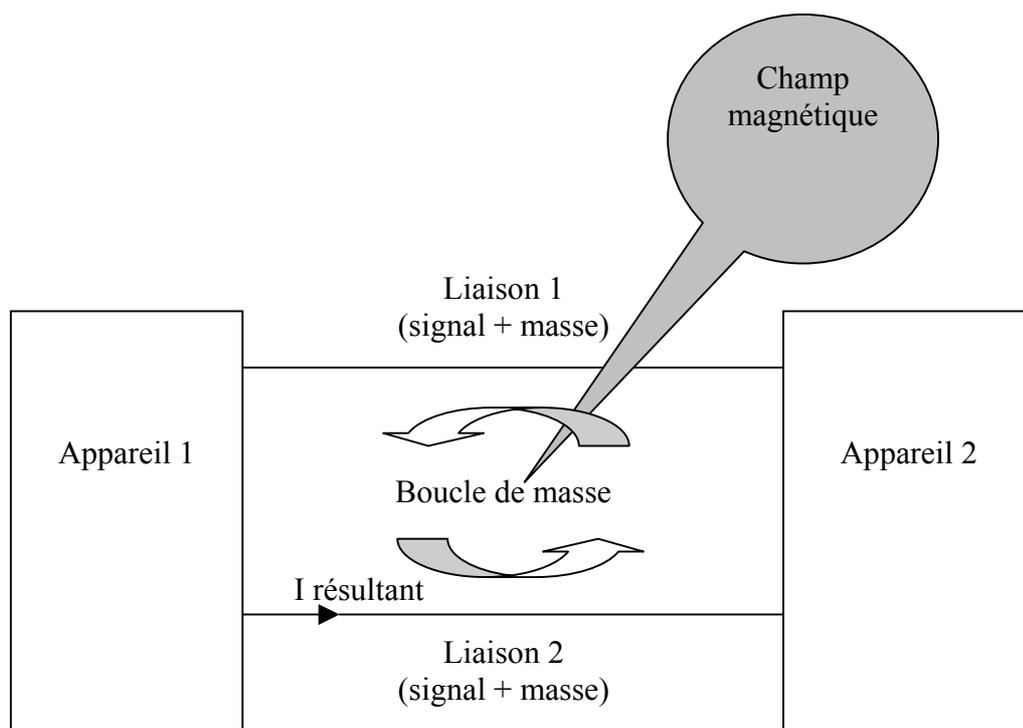
2-1-2-1 : Les boucles de masses

Une boucle de masse est une configuration de câblage telle que le conducteur de masse forme une boucle fermée.

Dans notre cas, il peut s'agir, par exemple, d'une boucle formée par deux cordons blindés distincts reliant les mêmes appareils. Les conducteurs de masse des cordons forment une boucle qui se referme complètement, via les châssis des deux appareils :

Figure 1 :

Boucle de masse.

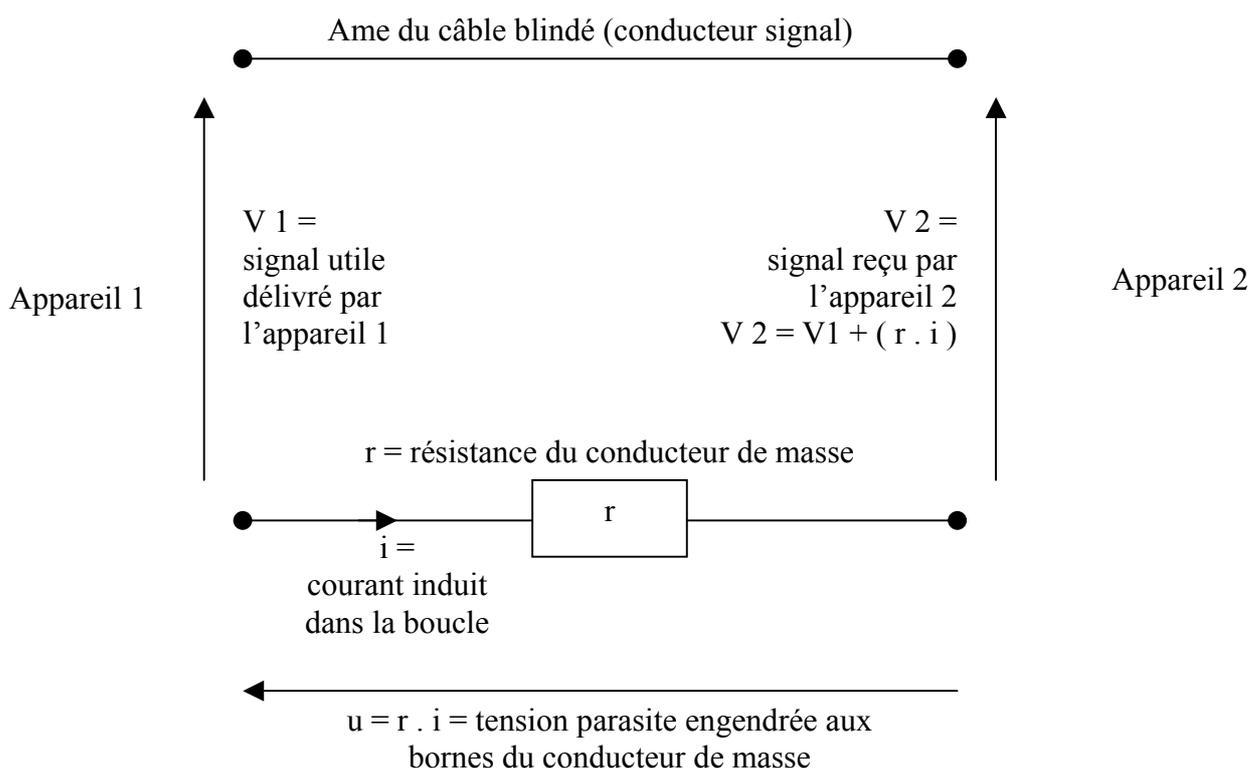


Cette boucle forme un récepteur privilégié pour les champs magnétiques parasites. Sous leur influence, il circule alors dans la boucle un courant « i » proportionnel au champ magnétique induit, conformément à la loi de Gauss sur l'induction magnétique. Tous les conducteurs présentent obligatoirement une résistance interne « r » non nulle (le câble de zéro Ohm n'existe pas !). Le courant parasite « i » induit provoque aux bornes de la résistance intrinsèque « r » du câble, une différence de potentiel « u » conformément à la loi d'ohm « $u = r \cdot i$ ».

Vue de l'appareil n° 2, cette tension parasite vient s'ajouter au signal utile délivré par l'appareil n°1.

Figure 2 :

La tension parasite « u » apparaissant aux bornes de la connexion de masse reliant les appareils 1 et 2, s'ajoute au signal utile.



Cependant, cette configuration de câblage procure au circuit des masses une impédance générale plus basse, liée à la redondance des connexions. Nous verrons donc plus loin que, selon les cas, elle sera à proscrire absolument, ou pas !

Il faut noter que l'efficacité de l'induction magnétique, appelée couplage magnétique, (on pourrait parler de rendement s'il ne s'agissait pas de la transmission d'un parasite!) augmente avec la fréquence ; tout comme la résistance intrinsèque des conducteurs (en courant alternatif, on dit leur « impédance »). Les perturbations engendrées seront donc particulièrement importantes avec tous les phénomènes rapides: commutation des régulations électroniques (à thyristor ou à triac) d'appareils thermiques, variateur électronique d'intensité lumineuse des générateurs de lumières, etc...

Rappelons-nous aussi que le phénomène "numéro un, toutes catégories" en terme de vitesse / énergie est la foudre. Voici donc un corollaire inattendu: une installation bien construite selon les règles de compatibilité électromagnétique, dans un soucis d'immunité aux parasites, sera plus résistante contre la foudre.

La plupart du temps, nous sommes en présence d'un mélange des trois types de propagation: conduction, rayonnement électrique et rayonnement magnétique.

En effet, après sa genèse par la source initiale, le parasite peut très bien proliférer en utilisant les autres modes de propagation. Par exemple, un conducteur traversé par un fort courant alternatif à 50 Hz va générer un champ magnétique à 50 Hz. Aux bornes d'un autre conducteur, baigné dans ce champ magnétique, naîtra un potentiel électrique alternatif à la même fréquence. Cette tension, à son tour, peut donner naissance à un courant le long de ce nouveau câble, voire même rayonner un autre champ électrique!

Ces parasites qui suivent les câbles par conduction, ou qui traversent les airs par rayonnement électrique ou magnétique, peuvent donc donner naissance à divers types de problèmes. Voici un récapitulatif des symptômes les plus couramment rencontrés sur les postes d'électrophysiologie:

2-2: Énumération des risques

Avertissement:

Bien sur, on voudrait pouvoir lire, sous chaque élément de cette énumération, le remède à appliquer. Ce n'est malheureusement pas possible car, comme nous le verrons au chapitre suivant, les remèdes s'appliquent, pour la plupart, préventivement lors de la conception. Le but de cette liste n'est donc, pour l'instant, que de connaître et de cerner le mal.

- **pollution électromagnétique rayonnante de la zone des électrodes et de la préparation.**

Symptômes:

Signal à 50 Hz, superposé au tracé, de forme assez proche de la sinusoïde. L'amplitude de ce parasite est fortement atténuée par l'interposition d'un écran de masse (papier d'aluminium relié à la masse) entre la zone des électrodes (la préparation) et l'environnement. Il s'agit de champs électriques.

Sources:

appareils ou câbles environnants rayonnant du 50 Hz.

- **pollution électromagnétique induite dans le câblage d'entrée des amplificateurs intra ou extra-cellulaires.**

Symptômes:

signal à 50 Hz superposé au tracé, souvent en forme de sinusoïde à demie redressée. La figure 3 en représente la forme. Il s'agit de champs magnétiques.

Sources:

boucles de masse

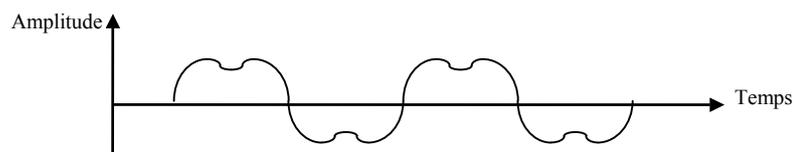


Figure 3 : boucle de masse, forme d'onde souvent rencontrée.

- **Diaphonie entre les voies.**

Symptômes:

passage d'une partie du signal sur les voies adjacentes

Sources:

Agencement inadapté du poste

Conception inadaptée des plaques d'aiguillage (voire des appareils multi-canaux eux-mêmes) : proximité de voies de stimulation et de voies de mesures, ou même, proximité de voies de mesures d'amplitudes très différentes.

- Instabilité, dérives sur l'intra-cellulaire.

Symptômes:

dérive de tension sur les voies intra-cellulaires

Source:

électrode de référence.

3- Les solutions:

"Les règles de l'art" pour monter un poste d'électrophysiologie: les règles de compatibilité électromagnétique

3-1: Introduction

Le seul remède efficace: la prévention. La qualité et les performances d'un poste d'électrophysiologie se jouent lors de son implantation, de sa conception et de son agencement. La majorité des règles édictées dans les chapitres qui suivent doivent s'appliquer dès ces étapes.

Il faut savoir que le mal est très sournois: si une ou deux règles ne sont pas respectées, le poste peut, malgré tout, fonctionner de manière tout à fait satisfaisante pendant longtemps ; le défaut peut n'apparaître que lors de certains concours de circonstances, dans un contexte donné ! Il sera alors délicat de diagnostiquer le problème et surtout difficile de le corriger sans repenser tout l'agencement du poste.

C'est pourquoi j'insiste sur le fait que chaque dérogation à ces règles, **conçédée pour des questions de confort ou d'ergonomie**, peut coûter cher tant en ce qui concerne les performances initiales du poste que sa fiabilité dans le temps.

Le deuxième danger sous-jacent qui guette ces postes est issu des modifications successives.

Rien de pire que les petites modifications successives d'un poste pour annuler les bonnes dispositions initiales. Le danger est souvent dissimulé car les problèmes ne se dévoilent pas tout de suite. Il est difficile, à posteriori, de faire la corrélation entre un défaut qui apparaît et sa source qui peut lui être bien antérieure.

3-2: Principe:

Les principes généraux à appliquer découlent, somme toute, d'un bon sens assez élémentaire. On peut faire l'analogie avec les règles d'hygiène et suivre le vieux dicton: on ne mélange pas les torchons et les serviettes!

Les différents appareils, câbles et zones du poste se classent en **deux catégories** bien distinctes: les appareils "**propres**" et les "**sales**".

Les "**propres**" sont constitués par tous les dispositifs qui traitent les signaux faibles, non amplifiés, directement issus de la préparation : c'est-à-dire la préparation biologique elle-même, les électrodes (de tout types), les câbles (ou dispositifs d'aiguillage des électrodes) et tous les amplificateurs qui y sont reliés. Soit : les électromètres intra-cellulaires de toutes sortes (WPI, AXOCLAMP, etc.), les amplificateurs extra-cellulaires et leurs câbles et sondes d'entrée (voir à la fin de ce mémoire, en figure 11).

Ces appareils seront tous disposés dans des zones protégées des rayonnements des champs électriques et magnétiques (conformément aux règles des chapitres implantation et agencement) et câblés selon des règles particulières (conformément au chapitre câblage).

Les "**sales**" sont tous les autres appareils non cités ci-dessus. Ces appareils traitent en général des signaux déjà amplifiés, ou délivrent de la puissance. Bien sûr, nous retrouverons aussi en zone sale tous les câblages secteurs. Dans le cas des postes du laboratoire, il s'agit donc des plaques de connexions (qui brassent les signaux déjà amplifiés), des systèmes de visualisation (oscilloscope), d'enregistrements (graphique et magnétique), d'acquisition informatique, du stimulateur et des alimentations.

Remarque:

*Ce concept a été récemment remis en question, notamment lors du congrès des électroniciens du CNRS organisé à Bonas (France) en mai 1999. J'ai effectivement pris en compte les remarques énoncées lors de ce congrès et effectué certaines rectifications et recentrages dans les applications que je décris. Cependant, contrairement à ce qui a été dit, je maintiens que ce concept est valide et incontournable dans ce domaine d'application particulier. Je parle de **la zone restreinte de la préparation électrophysiologique**, dans laquelle les signaux à véhiculer sont de l'ordre de quelques microvolts et les bruits de fond inférieurs au microvolt! J'admets que cette solution est un compromis, notamment vis à vis des perturbations à hautes fréquences, mais j'affirme qu'il est indispensable et qu'il reste le "meilleur compromis possible".*

3-3: L'implantation:

Il faut savoir que le choix même de la pièce peut avoir son importance. S'il est possible d'intervenir dès la construction ou l'aménagement des locaux, on pourra se référer à l'annexe 1, à la

fin de ce fascicule. C'était un petit récapitulatif destiné au maître d'œuvre du projet de réimplantation du laboratoire dans de nouveaux locaux en 1996. Il donnait la liste des sujétions que nous avons prévues pour les salles d'électrophysiologie et peut servir de référence.

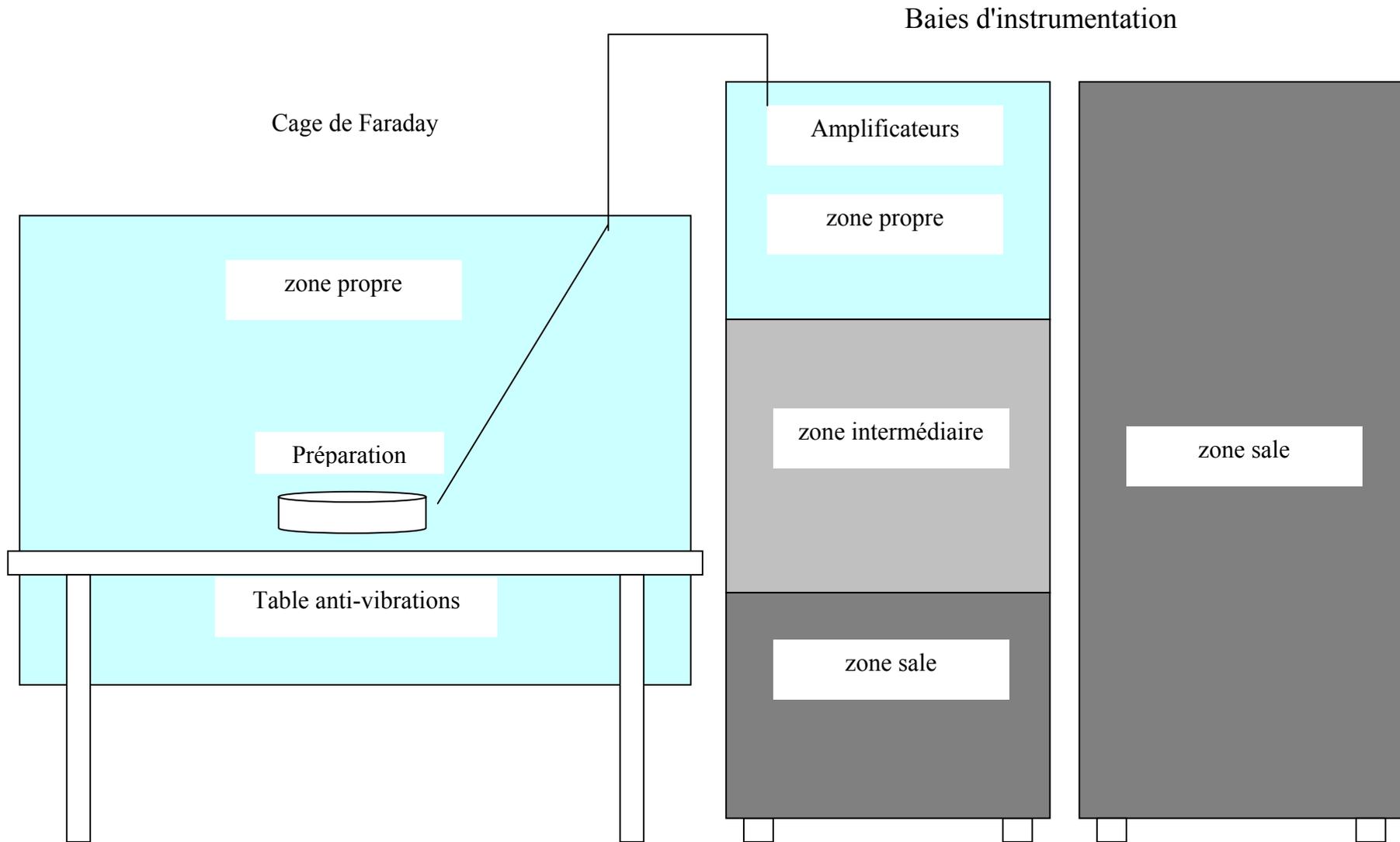
Il faudra ensuite choisir, dans la pièce, un emplacement pour le poste qui permette à la cage de Faraday contenant la préparation de se trouver éloignée des installations et armoires électriques, des tableaux de prises. Si on adosse la cage contre un mur, vérifier qu'il n'existe pas juste de l'autre côté du mur, un appareil pouvant générer un fort champ magnétique à 50 Hz: machine-outil, gros transformateur, moteur puissant. Il faut se méfier aussi des étuves et de cryostats régulés électroniquement. Je rappelle que les écrans et blindages n'arrêtent que les champs électriques, pas les champs magnétiques.

Positionner la ou les baies d'appareillages contre la cage de Faraday de manière à ce que les câbles "propres" qui relie la préparation à la baie transitent au plus court tout en restant dans des zones propres.

3-4: L'Agencement

Cette règle concerne l'agencement, le positionnement des appareillages dans les baies d'instrumentation et autour de la préparation. On pourra suivre les explications sur la figure 4, ci-après.

Figure 4: agencement de la cage de Faraday et des baies d'instrumentation



3-4-1 Les baies d'instrumentation:

Prévoir l'agencement des baies de façon à aménager une zone propre et une zone sale. Entre les deux, une zone intermédiaire servira de tampon séparateur.

3-4-1-1 La zone propre:

La **zone propre** est disposée côté cage de Faraday plutôt en hauteur dans la baie. Elle regroupe les amplificateurs extra-cellulaires et intra-cellulaires. Le choix de cet emplacement permet ainsi aux câbles d'entrée de filer vers la préparation par **la voie la plus directe en évitant toute proximité dangereuse** (câbles secteurs, écran d'oscilloscope). Lorsqu'ils sont connectés par la face arrière des appareils, ils peuvent cheminer contre la paroi latérale de la baie côté préparation, ou mieux, dans les montants métalliques en forme de U. Ils sortent de la baie par le haut. Il ne faut pas hésiter à faire une petite découpe dans la paroi latérale de la baie si cela peut éviter de juxter des zones dangereuses.

L'emplacement et le cheminement de ces câbles sont déterminants. Il faut donc les fixer afin qu'ils ne puissent pas être déplacés par inadvertance, lors d'interventions ultérieures. L'expérience m'a souvent démontré que si cette fixation est négligée, on s'expose à des pertes de temps, pour diagnostiquer un problème impromptu à des moments où le temps est crucial, pendant une expérience par exemple. Je fais cheminer les câbles des sondes intra-cellulaires sous les étagères souvent installées au fond de la cage de Faraday. Je les fais passer sur des pitons ouverts vissés sous une des étagères. Cela permet une bonne souplesse lors de leur disposition qui peut varier d'une expérience à l'autre.

Bien que classés en zone propre, ces amplificateurs possèdent, malgré tout, des câbles d'alimentation secteurs "sales". Ceux-ci peuvent cheminer contre la paroi latérale de la baie, **côté opposé** à la préparation et aux câbles d'entrée, ou mieux dans les montants métalliques en forme de U du côté opposé, bien sûr, aux câbles d'entrée. Ces appareils eux-mêmes sont conçus dans le souci permanent de faire cohabiter dans le même boîtier une zone secteur sale et une zone propre. Les constructeurs savent bien maîtriser ce genre de problème. Ils savent doser et limiter les champs magnétiques parasites à l'intérieur de l'appareil. Ils jouent aussi sur l'orientation de ces champs magnétiques de manière à ne pas recouper les zones propres. Ces appareils, bien que sensés être "propres", peuvent très bien rayonner un champ magnétique **dirigé vers l'extérieur** qui n'influencera pas leur fonctionnement intrinsèque. Les câbles propres, cheminant dans cette partie de la baie sensée être propre, éviteront donc aussi les zones proches de l'alimentation secteur de ces appareils et de leurs transformateurs d'alimentation placés souvent sur la face arrière. On reconnaît

la présence de ces transformateurs grâce à la protubérance sur la face arrière et la présence du fusible et du cordon d'alimentation secteur à proximité.

3-4-1-2 la zone intermédiaire :

Une **zone intermédiaire** est aménagée dans la baie au-dessous de la zone propre. (Suivre toujours sur la figure n° 4). Elle sert de zone tampon et permet l'éloignement indispensable de quelques dizaines de centimètres permettant l'atténuation des champs magnétiques émanant de la zone sale. Sauf cas particuliers, l'interposition d'écran de blindage n'est pas nécessaire, les champs électriques étant correctement arrêtés par les boîtiers métalliques des appareils. De toutes façons, cet éventuel écran de blindage ne permettrait pas la présence, sous cette zone, de câbles secteurs (que l'on ne pourrait pas rejeter vers le bas de la baie dans la zone sale), ou la présence de matériel informatique fortement perturbant ; ces dispositifs produisant aussi des champs magnétiques qui, eux, traversent les blindages.

Cette zone intermédiaire accueille une plaque d'aiguillage et, par exemple, les amplificateurs compensateurs de DC utilisés sur la chaîne de mesure intra-cellulaire. Les aiguillages de stimulation peuvent également y prendre place. Ce sont des dispositifs qui aiguillent les signaux issus du stimulateur vers les électrodes ou vers les amplificateurs intra-cellulaires. Ils peuvent véhiculer des tensions élevées mais les courants restent faibles. Ils génèrent donc surtout des champs électriques facilement bloqués par leurs boîtiers métalliques mais pas de champs magnétiques intenses. Ils trouvent leur place plutôt vers le bas de la zone intermédiaire.

En résumé, cette zone peut accueillir tous les dispositifs qui traitent des signaux déjà amplifiés (c'est-à-dire pas les signaux issus directement des électrodes ou des sondes) et qui ne génèrent pas eux-mêmes de perturbation électromagnétique (c'est-à-dire pas d'appareil de puissance).

3-4-1-3 la zone sale :

La **zone sale** est placée, en suivant, en dessous ou à côté de la zone intermédiaire. Avec des baies de 42 Unités de hauteur (une unité = 44 mm) on se retrouve à peu près à la hauteur des yeux d'une personne assise à son poste de travail. C'est donc l'emplacement idéal pour l'oscilloscope qui doit rester d'un accès immédiat. Viennent ensuite le stimulateur, les alimentations diverses. On peut classer ces appareils en fonction de la quantité de parasites qu'ils sont susceptibles de dégager et de la fréquence des accès de l'utilisateur à la face avant de l'appareil. La quantité de parasites est proportionnelle à la consommation de l'appareil, à sa puissance. Celle-ci est notée sur la face arrière, près du cordon d'alimentation. La fréquence d'accès est estimée par l'utilisateur ! Les appareils les plus puissants, par exemple les alimentations de puissance pour modules thermoélectriques, vont se retrouver tout en bas de la baie.

Le principe est le même lorsqu'il y a deux baies. On peut réserver une demie baie propre et une et demie baie. Si les baies sont juxtaposées, la distance séparant les appareils des deux baies en vis-à-vis est assez faible. Il faut alors tenir compte du fait qu'un fort champ magnétique peut passer d'une baie à l'autre à hauteur égale ($\frac{1}{2}$ baie haute droite à $\frac{1}{2}$ baie haute gauche).

Dans le cas de deux baies, la place est moins comptée et des accessoires peuvent être intégrés: tiroir, tablette coulissante, plaques à ouverture. Ils constituent de bonnes zones intermédiaires tampon.

3-4-1-4 Astuces de montage :

Quelques **astuces** générales sont à connaître pour le montage des baies.

Les montants de l'ouverture avant d'une baie sont pourvus de découpes carrées pour recevoir des « écrous en cage ». Ces derniers sont pourvus de deux ailes qui se clipsent dans les découpes carrées de la baie. Pour les mettre en place, il faut les présenter en biais sur la découpe carrée de manière à insérer une des deux ailes, puis clipser la deuxième aile à l'aide d'un tournevis fin et large présenté à 45 degrés. Pour démonter l'écrou en cage, visser juste d'un tour ou deux une vis sur l'écrou, placer un tournevis entre l'écrou et la tôle, le pointer à 45 degrés et donner une légère frappe dessus pour déclipser l'écrou qui ne tombe pas, retenu par la vis.

L'ouverture avant de la baie est divisée en "unités". Les constructeurs parlent de baies de "38 U" ou "42 U", ou d'appareils de "3 U" de hauteur. Une unité "U" représente 44 mm et est issue du système de mesure anglo-saxon, comme la largeur rackable de 19 pouces. Il faut impérativement veiller à placer les appareils dans la baie en restant en phase avec le pas des unités. L'erreur classique est de commencer la mise en place des appareils au milieu de la baie sans vérifier la phase avec le pas d'unité et de se retrouver bloqué à la fin. Cela ne concorde pas également au niveau des appareils munis de rails comme, par exemple, les oscilloscopes rackables. La fixation des rails ne coïncide plus avec les trous. Ne comprenant pas, on fixe le rail à l'envers (haut / bas ou droite / gauche) sur l'appareil pour récupérer la situation. Malheureusement, après cette tentative, les vis de fixation des rails viennent gêner la fixation de la face avant de l'appareil sur la baie et c'est la galère! Donc prendre toujours soin de mesurer la position du premier appareil par rapport au haut ou au bas de l'ouverture de la baie. Il est utile aussi de repérer, dans les entre-axes successifs inégaux des trous de fixation de la baie, la récurrence ou période de 44 mm qui va permettre de reconnaître les pas d'unité à l'oeil, sans sortir le mètre à chaque fois.

Les appareils étant en place, on ne laisse pas les cordons secteur pendre à l'arrière des instruments. On les fait passer par les côtés et derrière les éventuelles glissières. Ils descendent ainsi naturellement entre les appareils et les flancs de la baie, sans gêner le mouvement des tablettes, des

tiroirs, des instruments montés sur glissières et sans gêner la visibilité ni l'accès aux connexions sur les faces arrières.

3-4-2 La cage de Faraday:

La zone de la **préparation**, la **cage de Faraday** reste, bien sûr, l'endroit le plus critique et le plus protégé. Il **ne contient aucun appareil relié au secteur**.

Les générateurs de lumière, pompes péristaltiques, appareils périphériques indispensables à la préparation sont disposés en périphérie à **l'extérieur** de la cage de Faraday. Ils sont munis de cordons lumières, tuyaux ou câbles suffisamment longs pour respecter une distance de sécurité proportionnelle à leur puissance. Les générateurs de lumière sont à régulation non électronique: pas de réglage électronique de l'intensité lumineuse, uniquement des rhéostats, des commutateurs à positions fixes ou bien des diaphragmes mécaniques. Les tuyaux des pompes péristaltiques et des perfusions ne pendent pas près de prises ou de câbles secteurs.

3-5: Le câblage

Comme pour l'agencement, on retrouve pour le câblage deux univers fondamentalement opposés: le côté « signaux forts » et le côté « signaux faibles ».

Le côté « signaux faibles » concerne tous les câblages liés à la préparation biologique et aux amplificateurs extra et intra-cellulaires qui y sont connectés. D'une manière plus générale, il s'agit de tous les signaux de faible amplitude, qui n'ont pas encore été amplifiés. Dans d'autres domaines comme, par exemple, la mesure de forces, il peut s'agir des signaux issus du capteur.

Le côté « signaux forts » est constitué par tous les autres câblages, véhiculant des signaux de plus grande amplitude, dépassant une limite qui peut être fixée à environ quelques dixièmes de volts (0,1 à 0,5 volts) sous des impédances basses ; c'est-à-dire les signaux qui sortent des amplificateurs extra-cellulaires, des électromètres intra-cellulaires, de tout amplificateur en général.

La stratégie de câblage à appliquer est fondamentalement différente selon le côté.

3-5-1 Câblage côté signaux forts

Du côté des signaux forts, de "**l'univers sale**", le câblage est traditionnel.

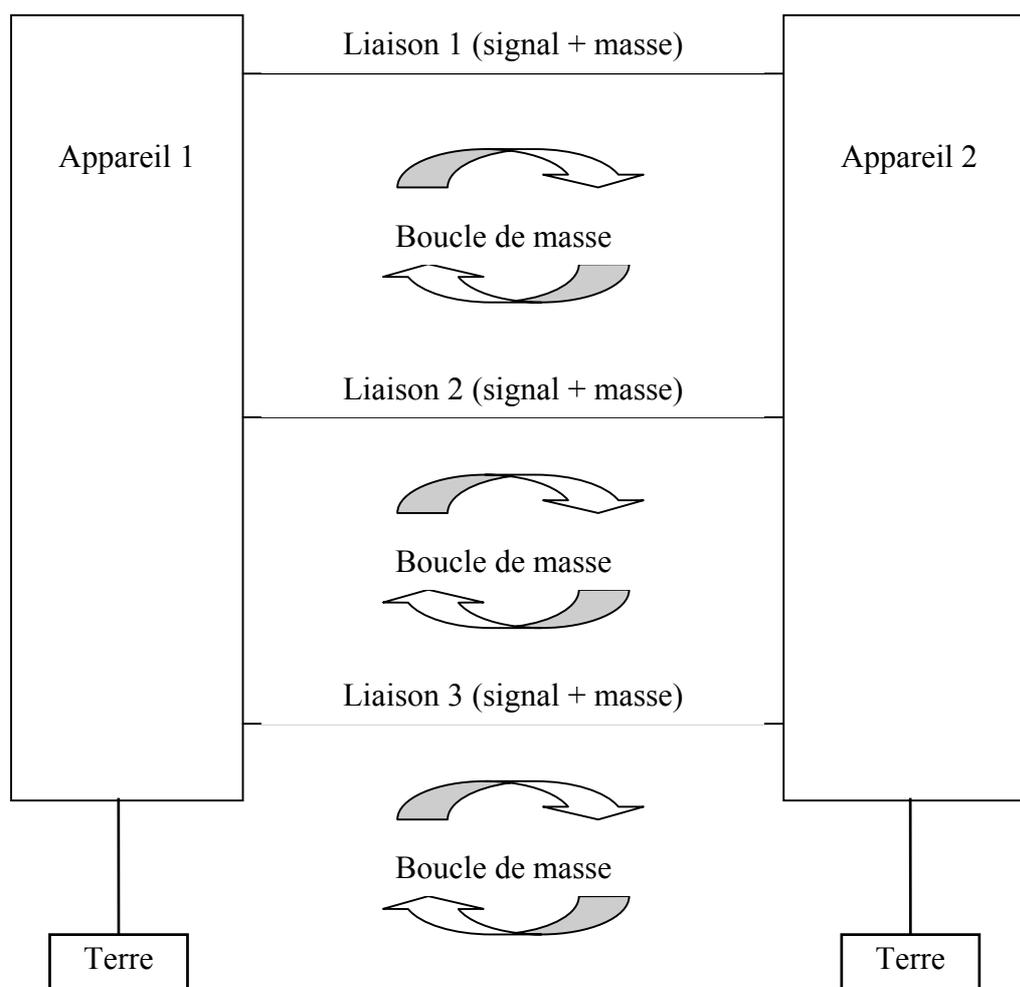
Les appareils sont presque tous munis de prises secteur à "2 pôles + terre". Leurs boîtiers sont donc reliés à la terre par le secteur. Les baies sont reliées à la terre via les boîtiers des instruments. C'est satisfaisant, surtout si l'installation respecte les règles électriques décrites dans l'annexe 1 intitulée "Electricité et Electrophysiologie".

Les signaux circulent entre tous les appareils et plaques de connexion par des câbles blindés traditionnels (BNC ou autre). Ces câbles procurent chacun, en plus du transit d'un signal, une liaison de masse supplémentaire entre l'instrument source et l'instrument cible. Ils effectuent donc une redondance de connexions des masses entre les instruments (d'autant plus que les masses des appareils sont déjà interconnectées par leurs boîtiers vissés dans la baie). Dans le cas de deux baies d'instrumentations juxtaposées, on les relie par un gros câble de masse. J'utilise souvent comme entretoises deux plaques de tôles placées entre les deux baies et vissées dans les montants prépercés des baies.

Cette redondance est favorable à l'immunité aux parasites conduits le long des câbles: parasites transitoires secteurs, parasites industriels. La configuration en "maille" de ce circuit de masse lui confère une impédance très faible. Les parasites sont bien écoulés vers la terre.

Figure 5 : câblage traditionnel

Boucles de masses multiples, réseau « maillé ».



Bien sûr, la redondance des liaisons de masse est source de boucles de masses multiples. Chaque boucle de masse forme une boucle conductrice fermée assimilable à une magnifique spire (voir dans le chapitre 2, le paragraphe « boucle de masse »).

Ces boucles, situées en milieu sale, présentent des surfaces importantes dans la baie (surface intérieure ou diamètre de la boucle) et recueillent facilement l'induction de champs magnétiques parasites.

Ce serait pénalisant en zone propre, sur des signaux de faibles amplitudes. Mais ici, en zone sale, c'est différent:

D'une part, ces boucles étant fermées et de **faible impédance**, l'amplitude des tensions parasites engendrées sur les liaisons est constante, prévisible et faible : quelques millivolts. Sur tous les postes utilisés au laboratoire, j'ai relevé des niveaux toujours inférieurs à 10 mV.

D'autre part, en zone sale, tous les signaux utiles sont déjà amplifiés. Ils sont réputés faire au minimum plusieurs centaines de millivolts d'amplitude. L'utilisateur du poste doit connaître ce principe : il ne faudra pas pousser exagérément le gain sur l'oscilloscope ou l'enregistreur de données sous peine de voir apparaître le secteur redressé caractéristique des boucles de masse (cf. fig. 3 chapitre 2.2). En cas de manque d'amplitude, il faut pousser le gain des amplificateurs en amont. C'est une règle générale en instrumentation.

En résumé, le câblage redondant des masses est recommandé en zone sale en raison de sa simplicité, de son immunité aux parasites impulsionnels et de la grande amplitude des signaux traités.

3-5-2 câblage côté signaux faibles

Du côté des signaux faibles, il en est tout autrement. La présence de boucles de masse dans le circuit de mesure provoquerait **des perturbations d'amplitude supérieure à celle des signaux mesurés** ! En effet, les signaux traités sont très faibles. Le signal utile sur une électrode extra-cellulaire est de quelques dizaines de microvolts. Les amplificateurs extra-cellulaires ont un bruit de fond ramené à l'entrée **de l'ordre du microvolt**. Le niveau du signal parasite produit par une boucle de masse n'est plus du tout négligeable par rapport aux signaux utiles.

Dans le domaine de l'instrumentation générale et, plus particulièrement dans les techniques de « **compatibilité électromagnétique** », on conseille alors de réduire l'impédance générale du circuit des masses en multipliant le principe du maillage décrit au chapitre précédent. Dans certains cas, on préconise même de créer un plan de masse métallique continu pour l'ensemble de la chaîne de mesure. Ce serait malheureusement encore **insuffisant dans notre cas** à cause du niveau extrêmement faible des signaux mesurés. De plus, la mise en œuvre serait très difficile.

Il faut donc utiliser d'autres moyens, une autre stratégie de câblage. Pour s'affranchir de tous ces problèmes, nous allons venir mesurer le signal utile à la source en prenant une « référence de mesure » propre, au plus près de la préparation biologique. Il faut donc maintenant définir la notion de « référence de mesure ».

3-5-2-1 : La notion de référence

Toute mesure se fait par rapport à une référence. Lorsqu'on mesure la hauteur d'une table avec un mètre, on mesure la différence entre le niveau du sol et le dessus de la table. Le sol est la référence sur laquelle reposent les pieds. Si le sol est irrégulier, la mesure sera faussée ; sauf si l'on pose l'extrémité du mètre très près du pied. Lorsqu'on visualise un signal sur un écran d'oscilloscope, on oublie souvent que c'est l'image d'une différence de potentiel entre deux points : le signal et la masse. Si la masse est connectée à un endroit mal choisi ou éloigné de la source, la mesure sera faussée car, comme nous l'avons vu au chapitre « boucles de masse », la tension n'est pas forcément la même aux deux extrémités du même conducteur.

Ainsi, lorsque l'on pénètre dans le corps d'une cellule nerveuse avec une micro électrode, on peut se poser la question : je mesure une différence de potentiel entre l'intérieur de la cellule et quoi ?

La réponse dépend de la nature de la conception de l'appareil utilisé. Il existe trois types de conception possible :

- 1- l'appareil mesure la ddp (différence de potentiel) d'entrée par rapport au châssis, c'est-à-dire au boîtier métallique qui le contient. C'est le cas au laboratoire, par exemple, des oscilloscopes Tektronix série 5000. Cette configuration ne convient pas à la mesure de signaux très faibles ($< \text{mV}$) particulièrement dans le cas de voies multiples.
- 2- l'appareil mesure la ddp (différence de potentiel) d'entrée par rapport à sa « masse électronique ». Cette masse est une référence interne pour l'électronique de l'appareil qui peut être **déconnectée du boîtier** en ôtant un cavalier prévu à cet effet (cavalier noté « GND / CHASSIS»). Cependant, cette masse est commune pour tout l'appareil et, en particulier pour les sorties. La méthode de câblage des masses des connecteurs de sortie peut donc interférer avec la précision de la mesure lue à l'entrée. C'est le cas, par exemple, des électromètres intra-cellulaires WPI utilisés au laboratoire.
- 3- l'appareil mesure la ddp (différence de potentiel) d'entrée par rapport à une entrée de référence. C'est la méthode qui permet les mesures les plus précises car le choix de la référence est totalement libre. L'entrée de référence peut être connectée ou on veut. Dans le cas des amplificateurs extra-cellulaires utilisés au laboratoire, l'entrée est notée

« e+ » et l'entrée de référence est notée « e- ». L'amplificateur dit « différentiel » amplifie la différence de potentiel entre e+ et e-.

Heureusement, dans cette zone propre, parmi les appareils traitant de faibles signaux, nous ne rencontreront pas d'appareil dont la référence est obligatoirement reliée au boîtier (cas numéro 1 ci-dessus). Ils seront soit du type à **masse électronique séparée du châssis** (cas numéro 2 ci-dessus), soit du type **différentiel** (cas numéro 3 ci-dessus).

Nous allons donc voir, pour chacun de ces cas, quelle stratégie de câblage adopter pour garder une référence de mesure propre. Nous verrons les problèmes rencontrés et l'apport du **câblage des masses en étoile** pour lever les dernières limitations.

Ensuite, le chapitre suivant "**APPLICATION**" présentera les schémas de câblage utilisés dans les postes d'expérimentation du laboratoire. Nous verrons comment ces trois types de câblages cohabitent.

Mais pour mieux comprendre, il est indispensable de les examiner séparément. Voici donc les principes et les limites d'application de ces trois méthodes:

3-5-2-2 : Appareils à masse isolée du châssis

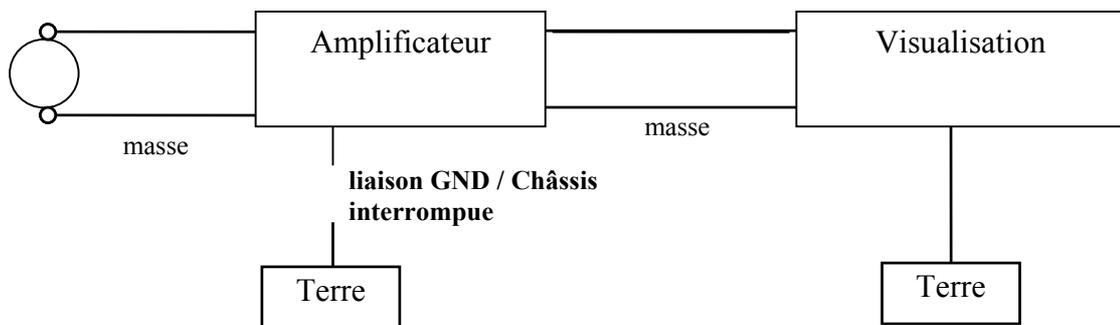
Les instruments traitant de très faibles signaux ont donc, « au minimum », la possibilité **de séparer leur masse du châssis**. En effet, il ne faut pas que les masses électroniques des appareils soient interconnectées par l'intermédiaire des boîtiers vissés sur la baie et par les terres des cordons secteur car il serait alors impossible d'éviter les boucles de masse.

Par masse électronique, on entend la masse du signal utile, sa référence zéro. Sur tous les appareils qui traitent de faibles signaux, les constructeurs ont donc séparé la masse électronique du boîtier. Le coffret reste obligatoirement relié à la terre secteur pour une question de sécurité évidente et la masse électronique est disponible sur un connecteur séparé noté « signal ground » ou « GND ». Quelque fois, l'appareil est muni d'un cavalier amovible qui donne le choix de lier (ou pas) la masse électronique et le châssis, selon les configurations d'utilisation. Dans le cas présent, pour les appareils directement reliés à la préparation biologique, le cavalier doit être ôté.

Au laboratoire, c'est le cas des électromètres WPI qui possèdent un cavalier « GND / CHASSIS) en face avant et des électromètres AXOCLAMP (pour les techniques de « PATCH CLAMP » et « VOLTAGE CLAMP ») qui possèdent une borne spécifique « signal ground », isolée du châssis, sur la face arrière.

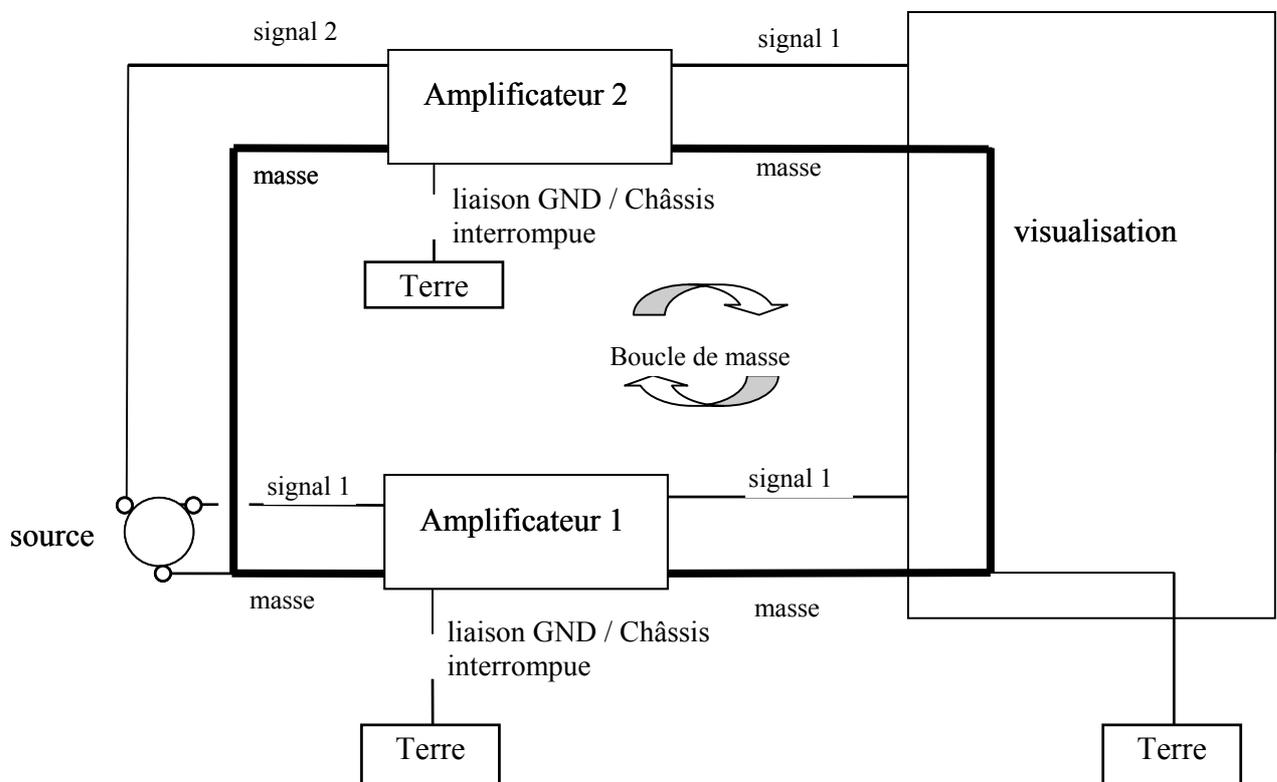
S'il n'y avait qu'une seule voie, tout serait alors résolu. Les appareils de la chaîne de mesures seraient interconnectés par des cordons classiques et un seul serait réuni à la terre. La figure qui suit montre cette configuration qui suffit à éviter les boucles de masse dans le cas d'une seule voie de mesure.

Figure 6: les appareils à masse séparée du châssis solutionnent les configurations à voie unique : pas de boucle de masse et mesure correctement référencée à la source.



Les choses se compliquent avec plusieurs voies. Cela va pourtant être le cas de la quasi totalité des postes d'expérimentation qui comportent souvent plusieurs voies extra-cellulaires et plusieurs voies intra-cellulaires. Le câblage traditionnel induirait forcément, dans ces cas, des boucles de masse. Par exemple, les masses des entrées de l'appareil de visualisation ci-dessous sont interconnectées intrinsèquement. Les deux entrées des amplificateurs doivent être référencées au plus près de la préparation. Résultat: il y a boucle de masse (trajet de la masse en gras):

Figure 7 : avec plusieurs voies, les appareils à masse isolée du châssis ne suffisent plus, il reste des problèmes de boucle de masse.



3-5-2-3 : Câblage des masses en étoile

Le **câblage des masses en étoile** permet d'éviter les boucles de masse dans les configurations multivoies. Le principe est d'instaurer un point nodal des masses, placé à un endroit stratégique, près de la préparation biologique. Ce point est la référence, le point "zéro" pour tous les amplificateurs de la zone « faibles signaux ». L'électrode de référence de la préparation, ainsi que les masses de tous les amplificateurs convergent en étoile sur ce point.

Le câble reliant la masse électronique de chaque amplificateur à ce point nodal doit être le **seul câble de masse** de cet amplificateur. Sinon, s'il existait un deuxième câble, un deuxième « chemin » pour la masse, il y aurait une boucle de masse.

Voici le détail de ce qui se passerait alors (comme il a été décrit en figure 2 du chapitre « les risques ») :

Sous l'action des champs magnétiques, des courants parasites s'établiraient dans la boucle et, notamment, dans le conducteur reliant l'amplificateur au point nodal des masses. Ce courant produirait une différence de potentiel parasite entre les deux extrémités de ce conducteur donc une différence de potentiel entre la référence de mesure de l'amplificateur et la référence de la préparation biologique. Cette tension parasite s'ajouterait au signal utile. C'est donc la somme signal utile + tension parasite qui serait amplifiée.

Alors que si l'on prend soin de ne garder qu'un seul « chemin » pour la masse de l'amplificateur, la boucle reste en quelque sorte « **ouverte** ». Aucun courant ne peut circuler dans l'**unique** conducteur de masse de l'amplificateur. Donc aucune tension ne peut naître aux bornes de ce conducteur, même si sa résistance intrinsèque n'est pas nulle. (dans la formule « $u = r \cdot i$ », si $i = 0$, alors $u = 0$ quel que soit r).

Les instruments en jeu de type "masse isolée du châssis" auront donc leur cavalier GND - CHASSIS enlevé. De plus, **les cordons branchés sur leurs sorties ne devront pas conduire la masse!** Je fabrique pour cela des cordons blindés dont la masse n'est connectée que d'un côté. Ils sont notés sur les schémas « cordon masse interrompue ». Ces cordons sont à utiliser avec parcimonie. Il ne faut pas les mélanger avec des cordons classiques car ils ne conviennent qu'à ce type d'utilisation. Sinon, lorsque les amplificateurs ou les appareils qui suivent sont de fabrication maison, j'effectue l'interruption de la masse directement à l'intérieur de l'instrument. C'est le cas des amplificateurs extra-cellulaires et des plaques de connexions que j'ai conçues. La consultation des notices techniques est donc indispensable lors du câblage de ces instruments. Lors du montage (ou du dépannage) d'un box, on pourra utiliser l'ohmmètre pour vérifier qu'un appareil du type décrit ici n'est bien réuni à la masse que par son unique fil branché sur sa borne "signal ground". En

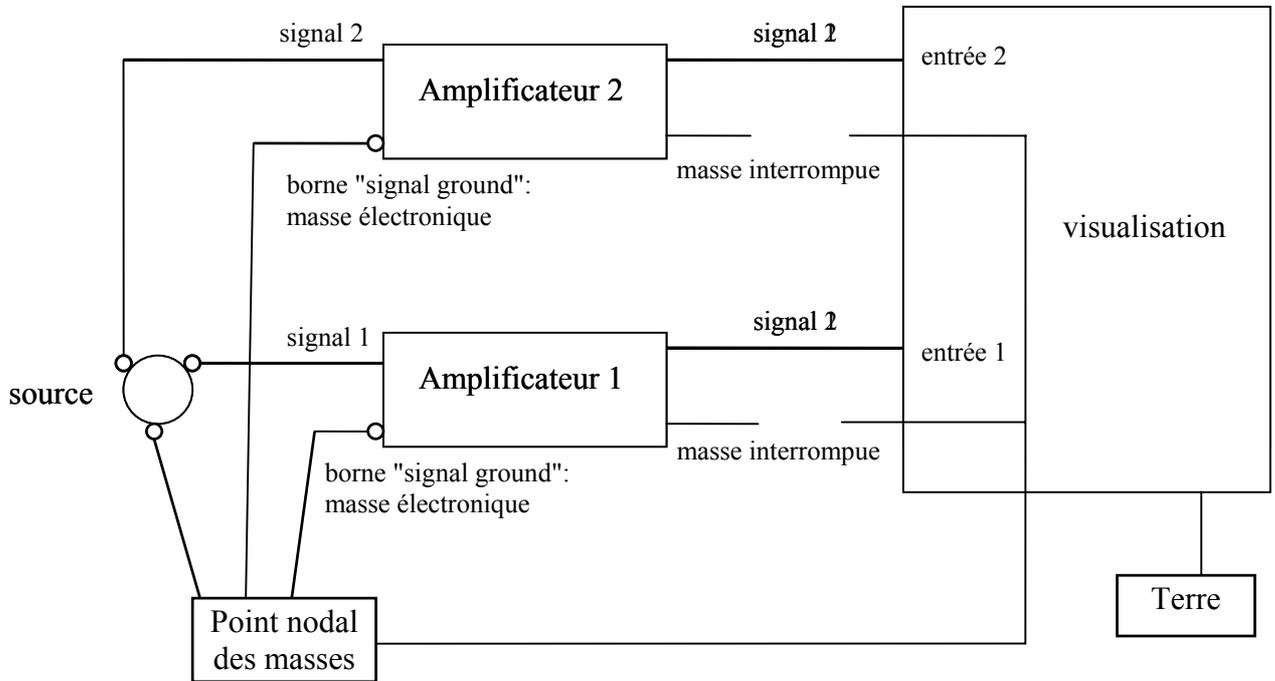
débranchant ce fil, l'ohmmètre ne doit plus indiquer de continuité entre la masse électronique de l'appareil et le châssis.

Ce point nodal est donc non seulement la référence "zéro volt" pour les entrées des amplificateurs, mais aussi pour leurs sorties. Il est placé au plus près de la préparation afin de représenter la meilleure référence possible pour les signaux issus des électrodes car ce sont les plus petits, les plus fragiles. Les signaux de sorties sont donc défavorisés. Leur référence est prise loin de la sortie, via un long câble de masse qui va courir de l'amplificateur situé dans la baie jusqu'au point nodal près de la préparation. C'est un compromis, on privilégie le côté où l'amplitude des signaux est très faible. Du côté de la sortie, les signaux sont déjà amplifiés. Leur amplitude dépasse obligatoirement plusieurs centaines de millivolts. (L'utilisateur y prêtera attention en poussant le gain en amont de la chaîne sur les amplificateurs, et non pas sur les dispositifs de visualisation en aval en cas de manque d'amplitude en sortie). L'éventuelle tension parasite qui peut naître au bout du câble de masse s'ajoute au signal de sortie et pas à celui d'entrée. Elle reste donc invisible en utilisation normale.

Pratiquement, j'utilise comme points nodaux des masses des petits blocs d'aluminium de 10 x 4 x 2 cm. Une fois percés de trous de 2 et de 4 mm de diamètres, ils peuvent recevoir les fiches bananes de diamètres correspondants. 4 pieds autocollants en caoutchouc finissent élégamment l'ustensile !

La figure ci-après donne le schéma des connexions. Je rappelle que l'implantation, la "géographie" des connexions est à respecter et que les deux extrémités d'un conducteur ne présentent pas les mêmes tensions parasites.

Figure 8: Le câblage des masses en étoile évite toutes les boucles de masse.



3-5-2-4 : Liaisons différentielles

La **liaison différentielle** est, quand l'appareillage le permet, la configuration la plus intéressante.

L'exemple le plus connu est le cas des amplificateurs différentiels extra-cellulaires. Ils amplifient la différence de potentiel entre leurs deux entrées $e+$ et $e-$. La tension de sortie V_{out} est donc:

$V_{out} = G (V_{e+} - V_{e-})$ ou G est le gain de l'amplificateur, V_{e+} la tension entre l'entrée $e+$ et la masse et V_{e-} la tension entre l'entrée $e-$ et la masse.

Dans le cas de l'amplificateur extra-cellulaire, l'intérêt est grand. Si les deux électrodes reliées aux entrées $e+$ et $e-$ sont symétriques en taille, en impédance, en longueur de fil, si ces deux fils cheminent ensemble dans la même zone, ils seront baignés dans le même champ et capteront chacun exactement la **même** tension parasite. L'équation devient alors:

$V_{out} = G ((V_{e+} + V_{par}) - (V_{e-} + V_{par}))$ ou V_{par} est la tension parasite ajoutée aux deux entrées.

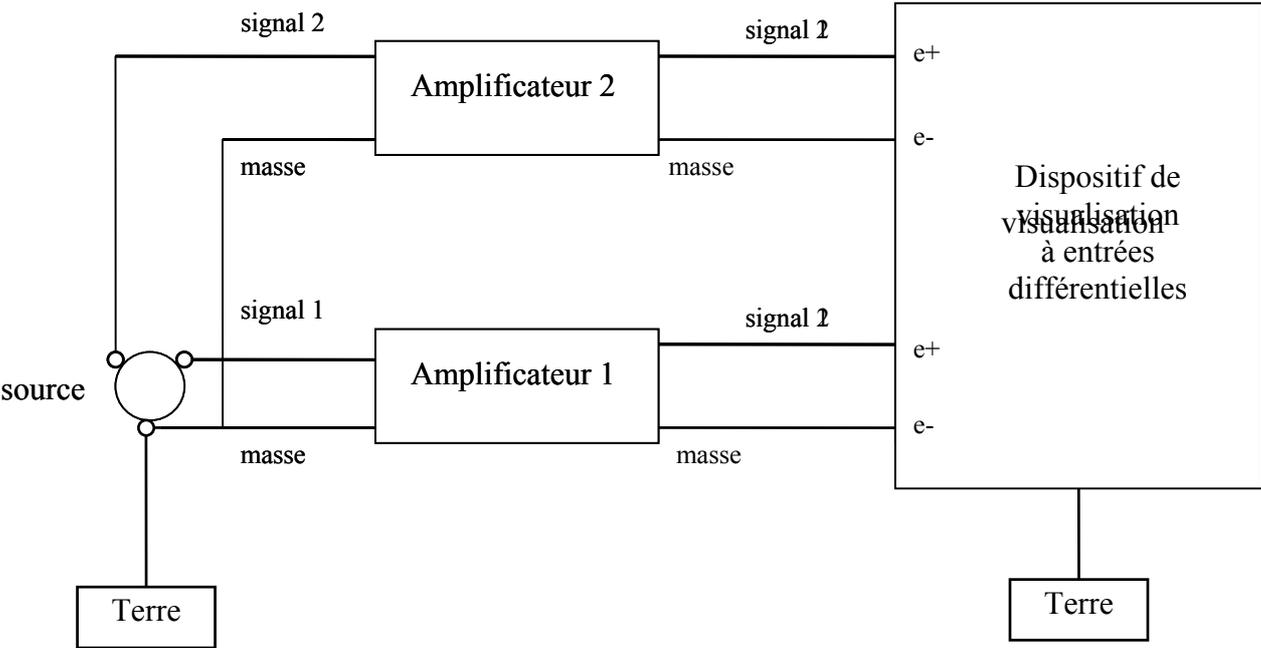
soit en effectuant:

$$V_{out} = G (V_{e+} - V_{e-})$$

La tension parasite disparaît du signal amplifié, d'où l'intérêt des électrodes bipolaires par rapport aux monopolaires.

Dans le cas de notre chaîne de mesures multivoies, nous allons appliquer cette conformation différentielle des entrées au dispositif cible, l'unité de visualisation. Comme on le voit sur la figure ci-dessous, cela permet de supprimer la boucle de masse.

Figure 9: La liaison différentielle évite les boucles de masse :



3-6: L'électrode de référence

Juste un petit mot sur les électrodes de référence utilisées au laboratoire dans les cas de préparations *in vitro* baignées dans un liquide physiologique de type saline.

Principe :

L'électrode de référence, comme son nom l'indique, sert de référence de tension aux mesures faites avec les électrodes monopolaires. (C'est le cas des micro-électrodes intra-cellulaires). Elle est immergée dans le liquide physiologique et est connectée au point nodal des masses situé à **proximité directe**, comme nous l'avons vu au chapitre « câblage des masses en étoile ».

Le problème réside dans le fait que tout métal plongé dans un liquide salé se comporte comme la pile de Monsieur Volta en 1801. Une certaine différence de potentiel va s'établir entre l'électrode et le bain de liquide physiologique. L'électrode de référence ne sera donc pas représentative du « 0 Volt ». Cette différence de potentiel va dépendre de la nature du métal (ou du matériau) employé. Nous allons nous intéresser à deux paramètres de cette tension: son amplitude et sa stabilité dans le temps.

Pour les enregistrements extra-cellulaires seuls : du platine.

Pour faire des enregistrements extra-cellulaires, on ne s'occupe pas du courant continu. Les fréquences à étudier varient de 1 à plusieurs centaines de Hertz. Dans quelques cas particuliers, on descend en dessous du hertz (pour l'enregistrement de potentiels de racine dorsale sur les invertébrés), mais c'est rare. Par contre, tous les amplificateurs extra-cellulaires peuvent être saturés par un excès de tension continue sur leurs entrées. L'approche de ce danger est invisible car ils n'amplifient pas le courant continu, puis la saturation survient et se traduit par la disparition du signal et une diminution anormale et soudaine du bruit de fond électronique habituel visible sur l'amplificateur au repos. L'amplificateur n'est pas au repos mais vraiment bloqué, il n'amplifie plus.

Donc, le paramètre "amplitude" de la tension résiduelle produite par l'électrode de référence est ici le plus important. C'est lui qui pourrait provoquer une saturation des amplificateurs.

Par contre, le paramètre "stabilité" n'a pas d'importance car la fréquence des fluctuations et dérives de cette tension est largement en dessous de la bande passante des amplificateurs extra-cellulaires.

Nous utilisons du platine qui présente une faible tension résiduelle dans le liquide physiologique. Cette tension n'est pas très stable, ce qui n'a pas d'importance ici.

Je fabrique ces électrodes de référence à partir de fil de platine de 0.2 mm de diamètre. Je l'enroule sur un petit foret pour lui donner la forme d'un petit ressort de 2 ou 3 mm de diamètre sur 1 ou 2 cm de long. La soudure du fil sur l'électrode ne doit pas entrer en contact avec le liquide physiologique. Sinon, il ne s'agirait plus d'une électrode de référence type platine / saline mais d'une de type plomb / étain / saline qui n'aurait pas vraiment les mêmes caractéristiques !!

Pour les enregistrements intra-cellulaires ou mixtes : de l'argent chloruré.

Les enregistrements intra-cellulaires exigent une stabilité maximale de la tension résiduelle de l'électrode de référence. L'amplitude de cette tension peut être facilement compensée par les réglages d'offset, de position de l'électromètre. Par contre, son manque de stabilité dans le temps induirait des dérives sur tous les tracés intra-cellulaire.

Les fabricants d'électromètres préconisent des ponts de type AGAR - AGAR mais nous avons l'habitude d'utiliser plutôt de l'argent chloruré. La stabilité obtenue est tout à fait correcte. Ces électrodes sont découpées dans de la feuille d'argent de 0.5 mm d'épaisseur, puis chlorurées par électrolyse dans un bain de HCL ou KCL. La conservation se fait facilement en stockant l'électrode dans un bain d'eau de Javel.

Bien sûr la connexion du fil sur l'électrode ne doit jamais entrer en contact avec le liquide physiologique sous peine d'instabilité et de dérive (pour la même raison que ci-dessus).

Il faut aussi faire attention à ne pas abîmer la couche de chlorure sur l'électrode, notamment ne pas frotter les angles qui sont les points faibles de cette couche.

Dernière précaution à connaître: lorsque l'électrode de référence est à demie immergée dans le bain de la préparation, la modification du niveau du liquide le long de l'électrode provoque une modification importante de la tension résiduelle et donc provoque des dérives importantes des tracés intra-cellulaires.

Donc éviter les vagues et les fluctuations du niveau du liquide induites par les dispositifs de perfusion. Si ce n'est pas possible, utiliser une électrode de référence dont la connexion est bien étanche en la plaçant sous le niveau du liquide. Ces types d'étanchéité sont cependant difficiles à obtenir, et peu fiables dans le temps (durée de vie courte).

4- Application : Schéma d'application pour les postes du laboratoire

Voici la solution finale, telle que je l'ai appliquée dans la majorité des postes d'électrophysiologie du laboratoire.

Il ne faut pas la répliquer telle quelle, mais l'adapter en fonction des configurations à monter. La bonne compréhension des principes de base énumérés dans ce mémoire doit permettre d'effectuer les modifications et adaptations de ce schéma en conservant le respect des règles de compatibilité électromagnétique. Le cas échéant, il ne faudra pas hésiter à utiliser l'ohmmètre pour vérifier, par exemple, qu'un appareil n'est bien réuni à la masse que par son unique fil branché sur sa borne "signal ground". En débranchant ce fil, l'ohmmètre ne doit plus indiquer de continuité entre la masse électronique de l'appareil et le châssis.

Le câblage de la "zone propre" est le plus critique. Les schémas indiquent les liaisons à faire mais ne peuvent pas décrire tous les détails annexes. Voici donc le détail des précautions annexes à prendre :

Autour de la préparation, il ne faut pas laisser de chose au hasard. Toutes les pièces métalliques doivent être à la masse de manière sûre. Sur les micromanipulateurs, les pièces mobiles montées sur des glissières, des axes ou des queues d'aronde, ou celles fixées par des pièces intermédiaires non métalliques, peuvent se retrouver isolées de la masse. Il faut alors les relier à la masse. Sinon, elles font office d'antennes et captent les champs électriques des alentours. Elles conduisent l'énergie captée et la restituent, en rayonnant, tout près de la préparation.

Ils faut éviter aussi les mises à la masse incertaines. Par exemple, si un accessoire métallique est juste posé sur la table conductrice, il peut bouger très légèrement et provoquer des parasites. Dans ce cas, il faut carrément l'isoler de la table en intercalant dessous des pieds isolants, et le relier à la masse par une connexion sûre.

De même, il faut se méfier de tout tuyau ou autre dispositif pénétrant dans la cage de Faraday. Qu'ils soient remplis d'eau, ou qu'ils soient recouverts de condensation et les voilà devenus conducteurs. Ils peuvent alors introduire dans la cage des parasites captés au dehors.

Inversement, les instruments ou parties de câblage qui ne doivent être réunis à la masse que par un seul fil, sous peine de boucle de masse, peuvent trouver un deuxième chemin sournois de

mise à la masse par l'intermédiaire d'un film de condensation. C'est le cas des portoirs de préparation en aluminium réfrigérés par des modules thermoélectriques à effet PELTIER. Dans certaines conditions ambiantes, ils peuvent se recouvrir d'un film d'eau condensée. La conductibilité de ce film est augmentée par la présence toute proche des solutions salines. Cela peut créer des boucles de masse furtives qui n'existent que lorsque la condensation est effective et qui restent indécélables le lendemain !

Si tous les appareils avaient des entrées différentielles, il y aurait beaucoup moins de problèmes. Mais malheureusement, on n'a pas le choix. Les électromètres du commerce sont tous à entrées monopolaires référencées à leur masse électronique (borne « signal ground »).

Les exemples de schéma qui suivent utilisent donc un mélange de toutes les méthodes présentées plus haut, pour s'adapter selon les cas aux appareils de tous types: masses flottantes, masse non isolée du châssis, liaison différentielle, liaison classique.

Notamment, parmi les amplificateurs extra-cellulaires mis au point dans le laboratoire, il existe deux modèles différents ayant des stratégies de câblage légèrement différentes. Je présente donc deux exemples de schéma.

Celui de la figure 10 correspond à l'utilisation des amplificateurs extra-cellulaires "maisons" du premier modèle, en version unitaire.

Celui de la figure 11 correspond à l'utilisation des derniers modèles, en version d'unité de six voies.

Figure 10: schéma final d'un poste d'électrophysiologie

Version avec les amplificateurs extra-cellulaires "maison" du premier modèle, en version unitaire.

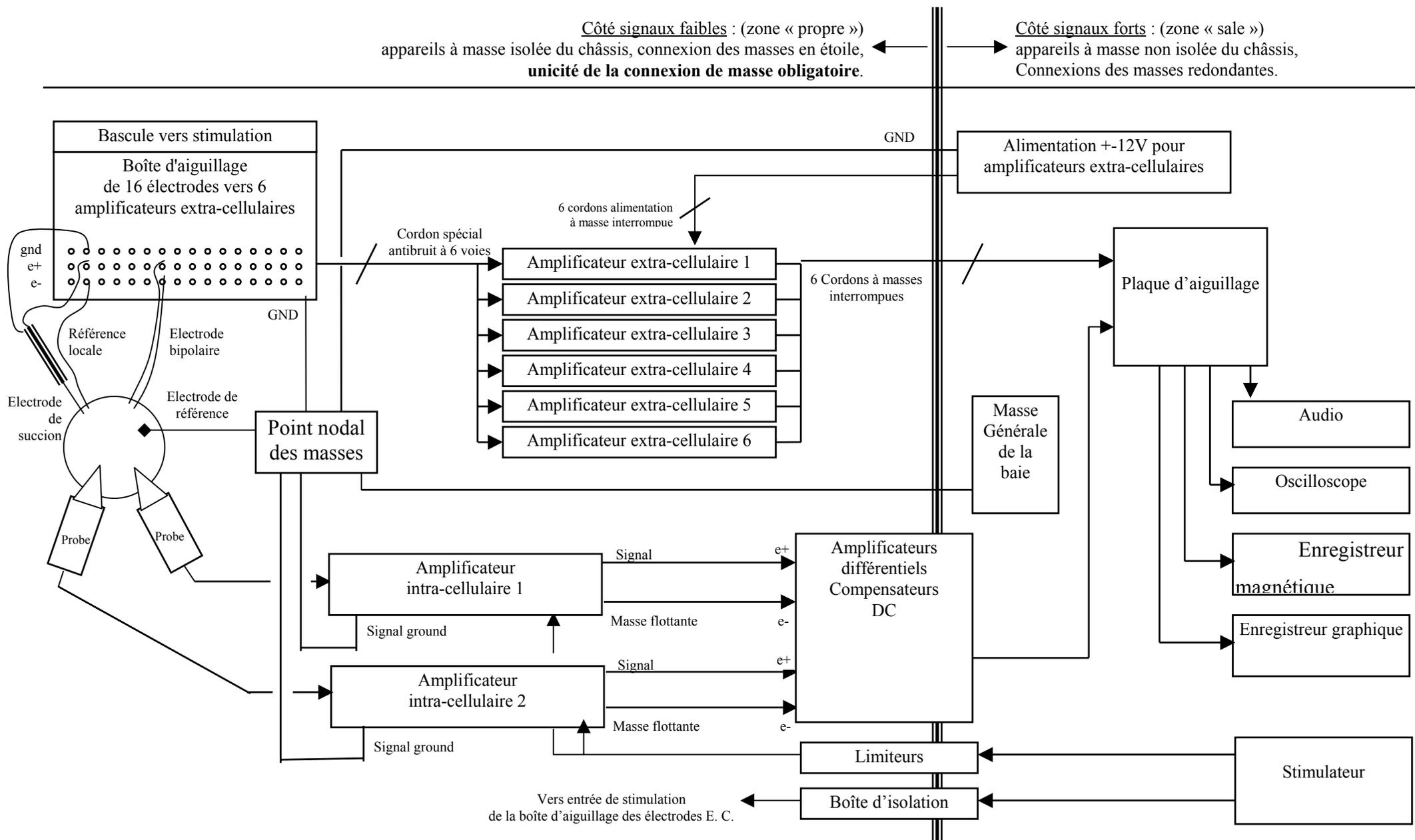
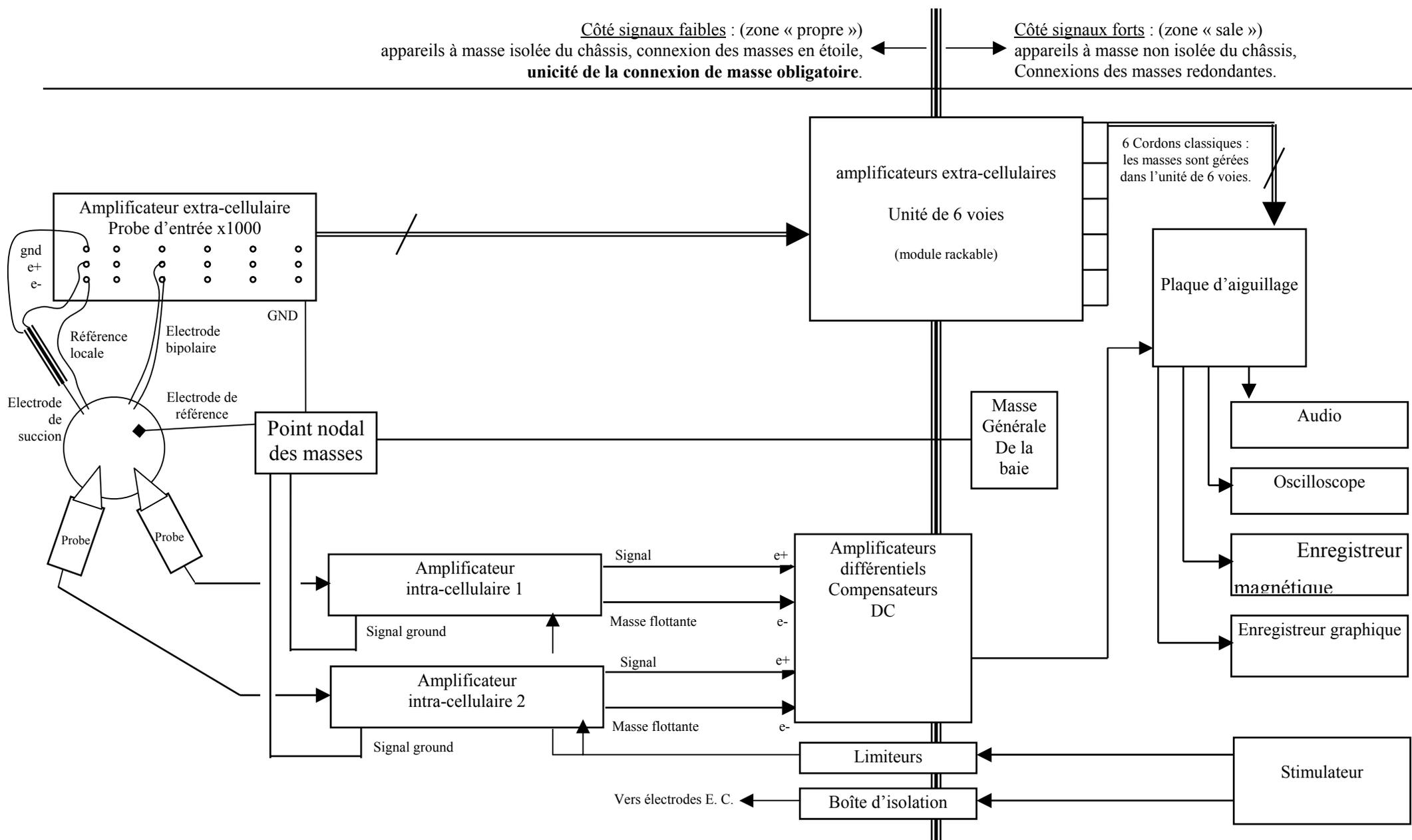


Figure 11: schéma final d'un poste d'électrophysiologie

Version avec les amplificateurs extra-cellulaires "maison" version 98/99 en unité de 6 voies.



5- Recherche des pannes

Le diagnostic des pannes et des problèmes de **bruits parasites** se fait en deux étapes:

1- localiser l'appareil ou la zone de câblage fautif.

Diviser la chaîne de mesure de manière logique, de la sortie vers l'entrée, en unités élémentaires facilement contrôlables (en compartiments) comme: un dispositif de visualisation, la connexion le reliant à l'amplificateur qui le précède, puis l'amplificateur lui-même, etc...

Eteindre, ou débrancher successivement les unités élémentaires et en déduire le compartiment fautif.

2- déterminer la nature du champ parasitant et son moyen d'accès au signal utile.

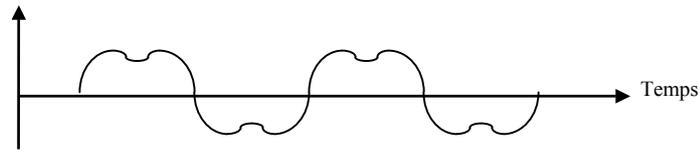
Mis à part le cas d'une panne, il ne peut s'agir que de problèmes de rayonnements électriques, rayonnements magnétiques ou de conduction de parasites.

Un rayonnement par champ électrique provoque un signal parasite de forme sinusoïdale assez pure. Ce sont surtout les électrodes et leur câblage vers les amplificateurs qui y sont sensibles. Ce type de rayonnement se diagnostique par interposition d'un écran entre les fils sensibles et la source du champ. J'utilise pour cela un petit "outil de détection des champs électriques". Ce n'est qu'un simple morceau de papier d'aluminium relié à la masse qu'il suffit de promener autour de la zone parasitée. On peut alors trouver, tel le chercheur d'eau, la direction de la source et sa position !

Il faut aussi essayer de mettre à la masses successivement les différents accessoires ou masses métalliques qui environnent la préparation, en surveillant la disparition du parasite.

Un rayonnement par champ magnétique provoque souvent un signal parasite de la forme déjà décrite au chapitre « Enumération des risques », dans les cas de boucles de masses :

Figure 12 : Forme d'onde relevée en cas de boucle de masse.



Le champ magnétique perturbant peut être localisé grâce à un petit « capteur de détection des champs magnétiques ». Un tel capteur peut se fabriquer facilement avec un simple cordon blindé, enroulé sur lui-même de manière à former une bobine de quelques spires. Une extrémité est court-circuitée, l'autre est branchée à l'entrée d'un oscilloscope. Ce capteur improvisé permet de localiser la source du champ magnétique.

Mais il est peu utilisé car la source est souvent connue et inévitable (présence de transformateur, de tube cathodique à proximité). On s'attachera plutôt à éliminer les boucles de masses qui captent le champ.

Enfin, bon nombre de problèmes proviennent de parasites conduits par les câbles. (Il s'agit le plus souvent des câbles secteur). Ces problèmes se diagnostiquent en observant la disparition du parasite au moment où on éteint l'appareil suspect. Un autre moyen très utile est d'essayer de corrélérer la fréquence d'apparition du parasite avec la fréquence de fonctionnement d'un appareil réputé perturbant.

Exemples :

- Thermostat d'un appareil réfrigérant. Période de commutation = quelques dizaines de minutes.
- Régulation d'un appareil thermique très précis. Période = quelques secondes
- Pompes péristaltiques. Fréquence des parasites = quelques Hertz.
- Moteur plus rapide en rotation. Fréquence = quelques centaines de Hertz.
- Etc.

Le cas des pompes péristaltiques est typique. Elles envoient sur le secteur des parasites conduits assez importants. Ces parasites sont stoppés facilement en intercalant un filtre secteur sur l'arrivée d'alimentation, au plus près de la pompe. Ces

filtres sont disponibles maintenant chez les distributeurs courants (filtres secteur « SCHAFFNER » par exemple).

6- Conclusion

J'ai écrit ce mémoire avec beaucoup de plaisir car il représente une bonne partie du savoir-faire que j'ai acquis durant ces vingt dernières années passées au service de l'électrophysiologie.

J'espère qu'il pourra rendre service à un maximum de personnes et j'aimerais beaucoup avoir des retours et des critiques (constructives) sur ce fascicule afin de l'améliorer et de le divulguer de manière plus large.

Merci.

P. CIRET

e. mail: p.ciret@epoc.u-bordeaux1.fr

ANNEXE 1 : Alimentation électrique et électrophysiologie.

Ce petit récapitulatif était destiné au maître d'œuvre du projet de réimplantation du laboratoire dans de nouveaux locaux en 1996. Il donnait la liste des sujétions que nous avons prévues pour les salles d'électrophysiologie.

Alimentation électrique et Electrophysiologie

Conseils pour la conception de l'installation électrique de locaux recevant des box d'électrophysiologie,

1) Règles impératives :

- Aucuns appareils d'éclairage fluorescent dans la pièce (uniquement de l'incandescent).
- Aucun appareil fortement perturbateur à proximité du box : transformateurs de puissance, tout appareil commutant de la puissance, cryostats, bains chauffants, appareil à régulation électronique, etc.
- Les blocs de prises électriques muraux et les goulottes les desservants seront disposés le plus loin possible de la partie sensible du box, c'est-à-dire de la préparation, des câbles la reliant aux amplificateurs extra et intracellulaires, ainsi que des amplificateurs eux-mêmes.
- Les appareils perturbateurs ne pouvant être évités (générateur de lumière, pompe péristaltique) seront munis de filtres secteurs (Schaffner ou équivalent) ou, plus simplement, de cordons secteur blindés et filtrés récemment disponibles chez Radio Spare.
- Les générateurs de lumière seront choisis parmi les modèles à réglage d'intensité par commutateur ou rhéostat, bannir tous les réglages d'intensité électroniques.
- Les blocs de prises muraux seront triphasés. Chaque prise sera marquée du numéro de la phase sur laquelle elle est branchée. On pourra ainsi séparer sur une phase le box et tous ses appareils sensibles, et sur les autres phases les appareils perturbateurs.

Il sera agréable et peu coûteux de prévoir, directement dans le bloc mural, un interrupteur pour les prises destinées au box.

Remarque :

L'informatique (ainsi que les nouveaux appareils numériques : enregistreurs papier numériques, etc.) entrent malheureusement maintenant dans la catégorie des appareils perturbateurs.

2) Règles apportant des améliorations :

Le ferrailage de la chape sera relié à la terre.

Si l'isolation des pièces est remaniée, on pourra, à moindres frais, inclure un grillage sommaire, relié à la terre, entre l'isolation et les murs.

- La distribution électrique de la pièce sera faite en câbles blindés (surcoût assez important).

- Les luminaires à incandescence seront choisis avec châssis métallique assez "recouvrant", réuni à la terre, et on pourra éventuellement (pour les cas désespérés !), les recouvrir d'un grillage laissant passer la lumière.

Remarque :

Toutes ces règles étaient appliquées dans les trois laboratoires du rez-de-chaussée de l'Aviron (+ dalles flottante sur feuille de liège !).

Cependant, seules les "règles impératives" ont été appliquées pour le laboratoire Steph./J.M.C. du rez-de-chaussée du bâtiment nord et je n'ai pas noté de grosses différences au niveau des perturbations.

3) Puissance :

- La puissance à prévoir est assez modeste pour les box eux-mêmes et ne dépasse pas quelques kilowatts. Par contre, il faut tenir compte de tous les appareils qui peuvent graviter autour, notamment ceux qui chauffent ou refroidissent: étuves, cryostat, plaques chauffantes, réfrigérateurs basses températures, eau distillée, etc. Dans ces cas, des puissances de 15 à 18 kilowatts par pièces ne sont pas rares, notamment pour les laboratoires de chimie. Il faut faire une estimation en fonction des appareils prévus dans la pièce.

Dans ce cas d'estimation, il faut adopter un coefficient de foisonnement plus défavorable que dans les cas ordinaires, afin d'éviter tout risque de disjonctions intempestives qui peuvent avoir, dans le cas de laboratoires, des conséquences beaucoup plus graves que dans d'autres domaines,

- Au niveau des protections différentielles, une séparation poussée des lignes est conseillée entre les box et le reste du bâtiment et même, dans le cas où trois box cohabitent dans la même pièce, entre les box eux-mêmes.

Le principe à obtenir est qu'un problème électrique (tant de surintensité que de défaut d'isolation) survenant dans n'importe quelle partie du bâtiment ne doit entraîner la disjonction que de sa section (la plus réduite possible, mais c'est une question de coût) et, bien sûr, en aucun cas la disjonction de la protection générale.