

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENNE

Faculté d'Electronique et d'Informatique



THESE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE

Doctorat en Sciences

En : Electronique

Spécialité : Instrumentation Electronique

Par : **M. Bachir LEHOUIDJ**

Sujet

**CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT DE
NOUVEAUX MODELES POUR LE DIAGNOSTIC DES
SYSTEMES DE PUISSANCE**

Soutenu publiquement le 02/05/ 2017, devant le jury composé de :

Mme N. SAÏDI	Professeur	à l'USTHB	Présidente
M. A. NACER	Professeur	à l'USTHB	Directeur de thèse
M. A. MEKHALDI	Professeur	à l'ENP	Examineur
M. M. TEGUAR	Professeur	à l'ENP	Examineur
M. K. MAZIGHI	Maître de Conférences/A	à l'USTHB	Examineur
M. T. OTMANE-CHERIF	Maître de Conférences/A	à l'UMMTO	Examineur
M. H. MOULAI	Professeur	à l'USTHB	Invité
M. A. AYADI	Chef de département	à l'GRTE	Invité

Dédicaces

A la mémoire de mon père et de mon frère Saïd

Qui vivront à toujours dans mon cœur

A ma mère, sans qui je ne suis rien

A ma très chère femme qui embelli ma vie

A mes enfants Abdallah et Aya et toute ma famille

A tous ceux qui me sont chers

Bachir

R e m e r c i e m e n t s

*Tout d'abord je tiens à remercier de tout mon cœur mon directeur de thèse Monsieur **NACER Azzeddine** et notre chef d'équipe Monsieur **MOULAI Hocine**, Professeurs à l'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB) pour le soutien, l'aide et le temps qu'ils ont consacré à mon travail et enfin pour m'avoir permis de soutenir, ainsi que leurs compétences scientifiques, leurs amitiés et leurs conseils avisés qui ont permis l'accomplissement de ce travail.*

Mes remerciements vont aussi à :

*Madame **N. SAIDI**, Professeur à l'université des sciences et de technologie Houari Boumediene (USTHB) qui me fait le grand honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.*

*Monsieur **A. MEKHALDI**, Professeur à l'école Nationale Polytechnique d'Alger (ENP) qui me fait l'honneur d'examiner mon travail.*

*Monsieur **M. TEGUAR**, Professeur à l'école Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger (ENP) qui me fait l'honneur en acceptant de s'associer à la commission d'examen.*

*Monsieur **T. OTMANE-CHERIF**, Maître de Conférences /A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou (U.M.M.T.O) pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant d'examiner ma thèse.*

*Monsieur **K. MAZIGHI**, Maître de Conférences /A à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB) non seulement en me faisant l'honneur d'accepter d'être membre de la commission d'examen mais aussi pour l'intérêt accordé à mon travail.*

*Monsieur **A. AYADI**, Chef de département au GRTE-Sonelgaz pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en me faisant l'honneur d'accepter d'être un invité dans le jury.*

Merci

Sommaire

	Page
Introduction générale	1
Chapitre I. Les diélectriques liquides, Aspects théoriques	4
I.1. Introduction	4
I.2. Isolants liquides	4
I.2.1. Rôle des isolants liquides	5
I.2.1.1. Fonction isolation	5
I.2.1.2. Fonction transfert de chaleur	6
I.2.1.3. Autres fonctions	6
I.2.2. Principaux types des isolants liquides	6
I.2.2.1. Huiles minérales	7
I.2.2.2. Liquides de synthèse	10
I.2.2.3. Huiles végétales ou esters naturels.....	11
I.3. Propriétés électriques des huiles isolantes	12
I.3.1 Permittivité électrique	12
I.3.2 Résistivité/Conductivité	13
I.3.3 Facteur de dissipation	14
I.3.4 Rigidité diélectrique et tension de claquage	16
I.3.5. Tendance à l'électrisation statique	17
I.4. Propriétés liées au transfert de chaleur	17
I.4.1. Viscosité et point d'écoulement	17
I.4.1.1. Viscosité dynamique	17
I.4.1.2. Viscosité cinématique	18
I.4.1.3. Point d'écoulement	19
I.4.2. Conductivité et capacité thermique	19
I.4.3. Masse volumique et coefficient de dilatation	20

I.4.4. Point d'éclair et point d'inflammation	20
I.5. Cause de vieillissement des huiles isolantes	21
I.5.1. Oxydations de l'huile minérales	22
I.5.1.1. Mécanisme et conséquences	22
I.5.1.2. Inhibiteurs d'oxydation	23
I.5.2. Humidité	23
I.5.2.1. Teneur en eau	24
I.5.2.2. Interaction papier/huile	24
I.5.3. Autres causes de vieillissement	24
I.5.3.1. Température	24
I.5.3.2. Décharges partielles	25
I.6. Conclusion	26
Chapitre II. Phénomènes des décharges partielles	27
II.1. Introduction	27
II.2. Phase de génération : génération d'une bulle de gaz	28
II.2.1. Dynamique des bulles	28
II.2.2 Paramètres influençant la tension de génération de streamers	29
II.3 Transition bulle – streamer	30
II.4 Propagation des streamers	30
II.4.1 Mécanisme de formation des streamers et leurs caractéristiques	30
II.4.2. Courant et émission lumineuse accompagnant les streamers	32
II.4.3. Influence des propriétés du liquide	33
II.4.3.1. Influence de la viscosité et de la masse volumique	33
II.4.3.2. Influence de la structure moléculaire	33
II.4.4. Influence de la pression	34
II.4.5. Influence de la température	34
II.4.6. Influence de la polarité	35
II.4.7. Influence de la géométrie des électrodes	36
II.4.8. Analyses spectrale et chromatographique	36
II.5. Étude statistique de la tension de claquage	37
II.5.1. Paramètres influençant la tension de claquage	37
II.5.1.1. Influence de l'humidité relative et des particules	37

II.5.1.2. Influence du temps d'application de la tension	38
II.5.1.3. Influence de la géométrie des électrodes et de la polarité de tension	39
II.5.1.4. Influence de la pression et de la température	40
II.5.1.5. Influence des barrières isolantes et du couvrement d'électrodes	41
II.5.1.6. Influence du vieillissement	41
II.6. Modèles d'évaluation des vitesses de streamers	41
II.6.1 - Modèle proposé par Devins, Rzađ et Schwabe	41
II.6.2. Modèles proposés par Watson et Watson et al.	42
II.6.3. Modèle proposé par N. Felici	43
II.6.4. Modèle proposé par A. Beroual	43
II.7. Modèle électrique de propagation de Fofana et Bérroual	49
II.8. Conclusion	52
Chapitre III. Technique expérimentale et Analyse énergétique	54
III.1. Introduction	54
III.2. Dispositif expérimental	55
III.2.1. Sources de tensions	55
III.2.2. Liquides testés	56
III.2.3. Cellule d'essai	56
III.3. Mesure des courants	56
III.4. Détection de la lumière émise	57
III.5. techniques d'analyse	57
III.5.1. La contenance spectrale (analyse fréquentielle)	58
III.5.2. Auto et inter corrélation	59
III.5.3. L'énergie et la puissance électrique	60
III.6. Analyse des énergies et puissances	61
III.6.1. Classification énergétique	61
III.6.1.1. Les streamers de classe « A »	64
III.6.1.2. Les streamers de classe « B »	66
III.6.1.3. Les streamers de classe « C »	68
III.6.2. Puissance des décharges partielles	70
III.7. Conclusion	72

Chapitre IV. Analyse Fréquentielle, Corrélations et modèle de propagation	73
IV.1. Introduction	73
IV.2. Analyse fréquentielle	73
IV.2.1.1. Les streamers de classe « A »	73
IV.2.1.2. Influence de la polarité	76
IV.2.2.1. Les streamers de classe « B »	78
IV.2.2.2. Influence de la polarité	80
IV.2.3.1. Les streamers de classe « C »	80
IV.2.3.2. Influence de la polarité	81
IV.3. Inter corrélation courant lumière	82
IV.3.1.1. Les streamers de classe « A »	82
IV.3.1.2. Influence de la polarité	86
IV.3.2.1. Les streamers de classe « B »	86
IV.3.2.2. Influence de la polarité	86
IV.3.3.1. Les streamers de classe « C »	89
IV.3.3.2. Influence de la polarité	89
IV.4. Analyse du modèle électrique de Fofana et Beroual	92
IV.5. Simulation du modèle adopté	94
IV.5.1. Streamers positifs	95
IV.5.2. Streamers négatifs	100
IV.6. Conclusion	103
Conclusion générale	106
Bibliographie	109

Introduction générale

L'utilisation des huiles isolantes dans l'industrie électrique, (transformateurs, condensateurs, câbles etc...), soit comme imprégnant d'isolations cellulosiques soit comme produits de remplissage des matériels remonte à longue date. Les huiles dans les transformateurs assurent non seulement l'isolation électrique, mais aussi l'évacuation de la chaleur des éléments internes par convection naturelle ou par écoulement réalisé par des pompes [1]. L'imprégnation des matériaux solides tels que papier et polymère (pour les condensateurs et les câbles) permet d'éliminer les microcavités gazeuses en les remplissant d'huiles qui possèdent une rigidité diélectrique plus grande que celle de l'air ; en plus ceci ralentit l'oxydation directe de l'isolation cellulosique. Ces propriétés ont permis de réduire la taille des transformateurs secs (isolés à l'air) dont les dimensions devenaient trop encombrantes avec l'augmentation des puissances des réseaux et leur multiplication [2, 3].

Les huiles minérales d'origine pétrolière ne sont actuellement plus utilisées pour la fabrication des condensateurs et sont de plus en plus remplacées par les huiles de synthèse. Mais leur faible coût et leur forte compatibilité avec les matériaux solides d'isolation (leurs propriétés diélectriques, telles que résistivité et permittivité diélectrique très proches de celle des matériaux d'isolation cellulosique) font que les huiles minérales restent encore très utilisées pour la fabrication des transformateurs de puissance qui en nécessitent de très grandes quantités [2].

Dans le but de la préservation de l'environnement, l'utilisation de certains matériaux isolants, dans la production et la distribution de l'énergie électrique tend à être fortement restreinte voir interdite par les recommandations européennes et internationales. L'huile minérale étant parmi ces matériaux, le besoin de liquides alternatifs, (dont les propriétés isolantes et comportementales seraient voisines sinon meilleures), s'est sérieusement fait sentir. Etant biodégradables, les huiles végétales, c'est-à-dire esters naturels à base de soja, tournesol, olive etc..., sont sujet de beaucoup de recherches d'actualité. Des travaux récents ont montré que si ces huiles présentaient un caractère de biodégradabilité et de résistance au feu très attractif, elles restent cependant moins intéressantes du point de vue stabilité à l'oxydation et de leur viscosité plus élevée que celle des huiles minérales ou synthétiques [4-8]. Un grand nombre de travaux ont

concerné l'étude des différentes huiles ainsi que leurs propriétés et les limites de leurs utilisations dans les installations hautes tension [2-28].

Quand l'ensemble d'isolation (papier huile) est soumis à des champs électriques intenses, la partie la plus faible peut localement claquer sans mener à la rupture totale de l'isolation. Ces claquages qui ne touchent qu'une partie de la couche isolante mixte sont dits décharge partielles. Ces derniers peuvent aussi se définir comme des micro-claquages ne traversant pas tout l'espace entre les éléments de potentiels différents qui contiennent les diélectriques. En général, la rigidité de la partie solide (papier) est supérieure à celle de l'huile ; ce qui fait que les décharges partielles ont surtout lieu à l'intérieur de la phase liquide proche des zones de champ intense (pointes, particules...).

Généralement, les micro-claquages sont localisés et ont une faible énergie comparativement à celle d'un arc électrique. Toutefois, leur persistance cause une dégradation non négligeable des diélectriques solides et liquides. C'est d'ailleurs l'un des plus importants facteurs de vieillissement du liquide et de l'isolation en général. Ces décharges partielles provoquent, par décomposition des molécules d'huile, l'apparition d'un certain nombre de gaz en bulles (tels que l'hydrogène (H_2), le méthane (CH_4), l'éthane (C_2H_6)...et même le CO_2 et le CO) ; ce qui affecte négativement la qualité de l'huile (les bulles de gaz sont des catalyseurs de l'apparition d'autres décharges partielles jusqu'au claquage complet) et peut même causer la mise à feu et l'explosion de tout le transformateur (à cause des gaz dangereux tels que l'acétylène et l'hydrogène).

Vu cet effet très néfaste qu'ont ces décharges partielles (entre autres causes de vieillissement comme la température, l'humidité etc...) sur la qualité des huiles, et par conséquent sur la durée de vie des équipements électriques qui les contiennent, elles constituent l'objet de plusieurs travaux de recherche d'actualité [29-46]. Le présent travail en est un autre et s'intéresse particulièrement à deux des plus importantes caractéristiques des micro-claquages qui sont les courants et les émissions lumineuses. Ces dernières, comme les autres caractéristiques d'ailleurs, sont influencées par plusieurs paramètres à savoir la géométrie de la structure et ses dimensions, le type de la tension d'alimentation, sa polarité et son amplitude etc.... Ceci est confirmé par de nombreux travaux [45-61].

En ce qui nous concerne l'enregistrement de ces caractéristiques se fait sur des échantillons d'huiles minérales en géométrie pointe plan, pour plusieurs distances inter-électrodes et le même rayon de courbure de la pointe et sous différents niveaux de haute tension continue (HVDC stress) pour les deux polarités positive et négative.

Il est vrai que la plupart des systèmes de puissance fonctionne en alternatif (AC), mais notre choix est animé par la grande tendance actuelle à revenir au continue pour le transport d'énergie en haute tension.

Notre modeste travail s'inscrit dans la recherche de nouveaux modèles qui doivent servir au diagnostic des phénomènes des décharges partielles ou leur prédiction. Il se divise en quatre chapitres dont le premier, qui est le fruit d'une large recherche bibliographique, expose les différentes huiles diélectriques utilisées ainsi que leurs caractéristiques physicochimiques. Les principales causes de vieillissement de ces liquides isolants, à savoir l'oxydation et ses mécanismes, l'humidité ou la teneur en eau, la température et enfin les décharges partielles y seront aussi détaillées.

Ces décharges partielles, leurs causes, leurs modes de progression, leurs caractéristiques si nombreuses (telles que leurs formes, vitesse, longueur finale, énergies, courants et émissions lumineuses, etc..) seront passées en revue dans le deuxième chapitre. L'influence des différents paramètres, que ce soit internes de l'huile (type, viscosité, structure moléculaire, etc..), ou externe dépendants des conditions d'expérimentation (telles que la température, la pression, la valeur de la tension et sa polarité etc..) sur l'amorçage [61-79] et la propagation des streamers seront aussi exposées ainsi que les modèles énergétiques et électriques développés pour l'étude de ces phénomènes [80-93].

Le troisième chapitre, quand a lui, sera consacré d'abord à la présentation du dispositif expérimental utilisé pour réaliser les différents enregistrements, puis des techniques d'analyse qui nous ont permis d'exploiter les nombreuses courbes de courant et d'émission lumineuse enregistrées et enfin à l'analyse énergétique qui nous a mené à améliorer le modèle de classification des streamers.

Enfin le dernier chapitre montrera les différents résultats obtenus concernant tout d'abord, l'examen des empruntes fréquentielles de chaque classe ainsi que la mise en évidence par calcul de corrélation des ressemblances entre les courbes de courant et celles des émissions lumineuses associées au même événement dans le but de répondre à une question assez importante au sujet du choix de la caractéristique la plus informative (courant ou lumière) lors de la caractérisation des pré-claquages. Le circuit électrique que nous avons adopté, suite à quelques modifications complètement fondées que nous avons apportées à un modèle déjà existant concernant la propagation des streamers sera exposé tout autant que l'interprétation et la loi de variation de chacun de ses éléments. Et enfin des simulations de ce dernier et l'analyse des résultats qui en découlent par application des techniques citées en chapitre trois serviront à sa validation.

Tout cela sera couronné par une conclusion générale.

Chapitre I

Les diélectriques liquides, Aspects théoriques

I.1. Introduction

De façon générale, l'isolation à l'intérieur des équipements haute et moyenne tension n'est pas assurée par une seule substance, mais plutôt par des structures mixtes combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz. Ce genre de structures isolantes est surtout rencontré dans les dispositifs tels que les transformateurs et les condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles de haute tension, ainsi que les lignes aériennes (isolateurs de support et de traversée). Les volumes des appareillages déterminent les quantités d'huiles utilisées à l'intérieur de chacun. Elles peuvent varier de quelques litres pour les condensateurs de puissance à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de même type. Les isolants solides sont utilisés, dans le cas des disjoncteurs par exemple, tant comme enveloppes que comme isolants alors que pour les transformateurs de puissance ils servent aussi de panneaux et de barrière isolante pour ceux dits cuirassés. Les fluides, non plus, n'assurent pas uniquement la fonction d'isolation mais jouent aussi le rôle de caloporteur.

Tout au long de ce chapitre, nous nous pencherons principalement sur les isolants liquides (huiles) utilisés dans les transformateurs de puissance. Nous exposerons les différents types d'huiles isolantes, leurs propriétés (avantages et inconvénients) ainsi que leurs rôles dans le bon fonctionnement des matériels électriques en particulier les transformateurs de puissance.

I.2. Isolants liquides

Nous désignons par cette appellation tous les liquides de résistivité électrique suffisamment élevée (quelque soit leurs origines) pour être installés entre deux ou plusieurs conducteurs de potentiels nettement différents afin d'éviter les éventuels contacts électriques.

I.2.1. Rôle des isolants liquides

Il est connu que la rigidité diélectrique des liquides est beaucoup plus importante que celle des gaz, c'est pour cela que les huiles ont pour principal rôle de combler les microcavités (remplacer l'air qui s'y trouvait) existantes dans les isolants cellulosiques utilisés en électrotechnique. Ces derniers sont donc convenablement imprégnés de liquide dans le souci d'augmenter leur pouvoir diélectrique. En plus, les huiles isolantes remplissent tout le volume intérieur des dispositifs de haute tension. Ce n'est pas tout, dans certaines applications elles assurent aussi la tâche d'évacuation de la chaleur d'un assemblage [1].

Cette technique de remplissages par des huiles, qui a été développée depuis plus d'un siècle, est très largement utilisée dans les transformateurs de puissance. Mais les transformateurs dits de distribution peuvent ne pas contenir de liquide et ils sont donc qualifiés de « secs ». Cependant une multitude de raisons justifient la préférence de l'utilisation des liquides diélectriques [2]:

- Par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que ceux de même puissance mais secs.
- Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.
- Les analyses d'huile (teneur en eau, analyse de gaz ...) permettent de diagnostiquer l'état du transformateur à moindre coût.
- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs.

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions [3] :

I.2.1.1. Fonction isolation

L'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents, à l'intérieur des transformateurs de puissance, est assurée soit :

- Par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- Par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.
- Par une isolation mixte: combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides, c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction isolante sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de perte ($\tan \delta$), la permittivité diélectrique et la résistivité. Ces caractéristiques sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur et seront exposées plus en détail plus loin [3].

1.2.1.2. Fonction transfert de chaleur

Plusieurs causes sont à l'origine de l'élévation de la température à l'intérieur des dispositifs de puissance. Entre autres, les transformateurs sont le siège de pertes non négligeables (soit par effet joule soit par phénomènes d'hystérésis et de courants de Foucault dans les noyaux de fer), responsables de dissipation de chaleur qui augmente fortement avec la puissance, même si leur rendement est particulièrement élevé (98 à 99%). Donc pour assurer un bon fonctionnement, il est inévitable de prévoir une évacuation de cette chaleur vers l'extérieur ce qui permet le refroidissement adéquat. La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers les radiateurs extérieurs. Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée. Le refroidissement étant assuré par convection et par conduction thermique, les principales caractéristiques qui peuvent influencer l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

1.2.1.3. Autres fonctions

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises). Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [3].

1.2.2. Principaux types des isolants liquides

De façon générale, il n'existe pas de liquides isolants pouvant remplir l'ensemble des propriétés requises pour une application donnée. Les caractéristiques électriques, chimiques et physiques d'un liquide diffèrent donc d'une application à une autre. Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types : les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse (Tableau I.1). Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour

pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs.

1.2.2.1. Huiles minérales [2]

Obtenues par raffinage, à partir de bruts de pétrole, Les huiles minérales sont les plus utilisées dans les matériels électriques. Elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolants celluloses. Quelque soit le cours du brut, les huiles minérales sont presque toujours disponibles et à des prix assez bas. C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus communément utilisées dans les transformateurs de puissance. Aussi, avec le développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification ...), les propriétés des huiles minérales n'ont cessé de s'améliorer depuis leur première utilisation au début du siècle dernier. La composition chimique des huiles minérales est complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) et est généralement définie par la teneur en carbone paraffinique (Cp), en carbone naphténiq (CN) et en carbone aromatique (CA) (Figure I.1).

⌘ **Structure paraffinique (Cp):** les molécules de ce groupe sont aussi connues sous le nom d'hydrocarbures saturés en chaînes droites ou alcanes, qui peuvent être linéaires (n-alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes) et dont la formule générale est C_nH_{2n+2} . Les molécules paraffiniques ont une stabilité thermique plus faible que les molécules naphténiqes et aromatiques.

⌘ **Structure naphténiq (CN):** les molécules de ce groupe sont également connues sous le nom d'hydrocarbures saturés cycliques ou cycloalcanes. Elles correspondent à des chaînes carbonées fermées de formule générale C_nH_{2n} . Les structures paraffinique et naphténiq ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble).

⌘ **Structure aromatique (CA):** ces molécules sont des composés cycliques, aussi appelées hydrocarbures insaturés, de formule générale C_nH_n . Elles sont totalement différentes des molécules paraffiniques et naphténiqes, mais jouent un rôle très important dans les propriétés d'une huile minérale. On les trouve sous deux formes: les monoaromatiques et les polyaromatiques dont certaines sont considérées comme cancérigènes. Ces composés aromatiques permettent à l'huile d'avoir une bonne résistance à l'oxydation (production de phénols qui détruisent les radicaux), de bonnes propriétés de gassing et une bonne rigidité en impulsion [4].

Catégorie	Type
Huiles végétales	Huile de ricin
Huiles minérales	Naphténiques
	Paraffiniques
	À masse moléculaire élevée
Hydrocarbures de synthèse linéaires insaturés	Polybutènes
Hydrocarbures aromatiques de synthèse	Alkylbenzènes
	Alkylnaphtalènes
	Alkylbiphényles
Hydrocarbures linéaires chlorés	Perchloréthylène
Hydrocarbures aromatiques chlorés	Trichlorobenzènes
	Polychlorobiphényles (PCB) <u>(1)</u>
	Polychlorophénylalcane
Hydrocarbures linéaires chlorofluorés	Trichlorotrifluoroéthane
Hydrocarbures aromatiques éthyléniques	Alkyldiaryléthylène
Esters organiques <u>(2)</u>	Néocaprâte de benzyle
	Diocylphtalate
	Esters phosphates
	Esters du pentaérythrol
Éther-oxydes	Ditolyléther
Silicones liquides	Polydiméthylsiloxanes (PDMS)
	Polyméthylphénylsiloxanes

Tableau I.1. Différentes catégories d'isolants liquides [5].

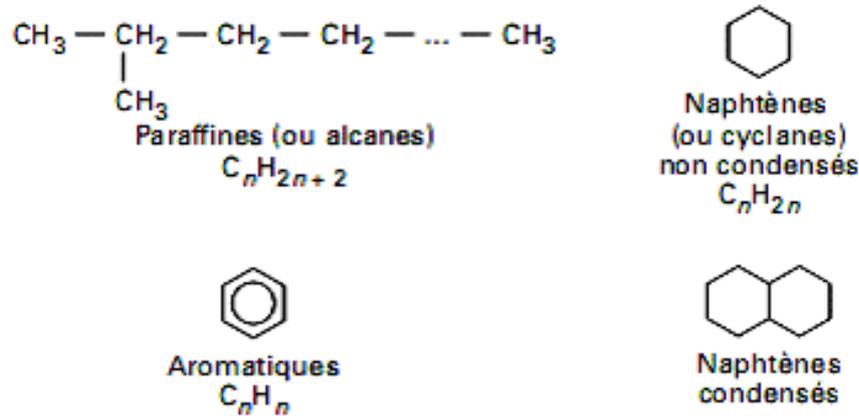


Figure I.1. Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale [1].

Les huiles minérales contiennent également un faible pourcentage de molécules d'hydrocarbures, qui comprennent dans leur structure d'autres éléments comme l'azote, le soufre et l'oxygène. La figure (I.2) montre un des grands avantages des huiles minérales en particulier les huiles naphténiques. Elle expose la variation de la viscosité de plusieurs types d'huiles en fonction de la température et nous remarquons que celle de l'huile minérale est la plus faible. Ceci permet une bonne évacuation de la chaleur et un démarrage à froid correct, mais aussi une bonne imprégnation des isolants celluloseux. La viscosité des hydrocarbures est corrélée à leur masse moléculaire: plus un produit est léger, plus sa viscosité est faible. Cependant, plus un produit a une masse moléculaire faible, plus il est volatil, et donc plus il est inflammable [1]. Justement cette inflammabilité constitue l'un des inconvénients majeurs des huiles minérales. En effet, ces huiles possèdent un point éclair relativement bas. Ceci représente un sérieux problème pour les appareils installés en zone urbaine comme les transformateurs de traction ou de distribution.

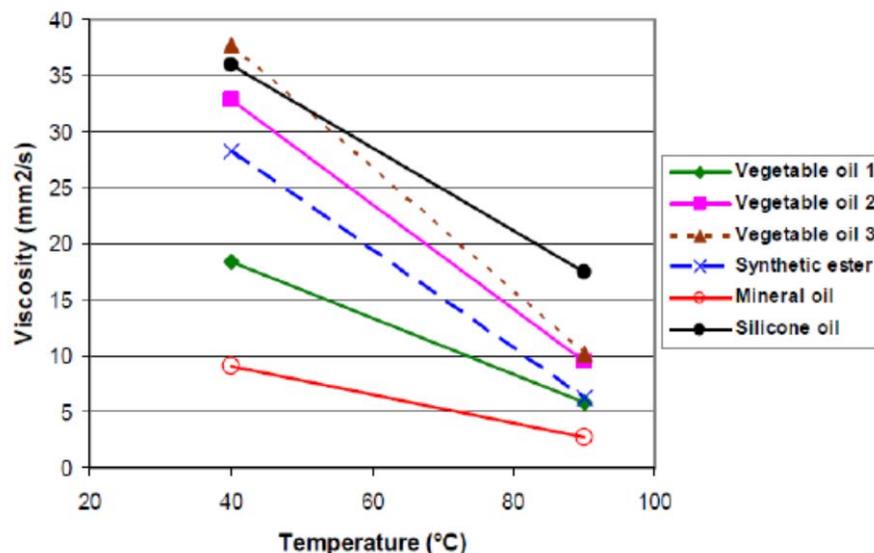


Figure I.2. Évaluation de la viscosité cinématique des huiles en fonction de la température [6].

Moins dramatique, pour les gros transformateurs de puissance qui se trouvent en générale loin des populations, ce problème est cependant loin d'être sans conséquences économiques néfastes vu les dégâts considérables qu'il provoque sur les différentes parties des installations qui leurs sont connectées.

Les principaux problèmes en rapport avec la toxicité sont liés au fait que certaines molécules polyaromatiques contenues dans les huiles minérales sont classées comme cancérigènes. Du point de vue écotoxicité, les huiles minérales peuvent être néfastes à l'environnement lorsqu'il y a des fuites au niveau du transformateur, dans le sens où elles sont potentiellement accumulatives (bioaccumulation, contamination de la chaîne alimentaire possible).

1.2.2.2. Liquides de synthèse

Malgré la très importante place qu'occupent les huiles minérales parmi les liquides diélectriques dédiés aux applications électrotechniques, les huiles de synthèse sont utilisées à chaque fois que des propriétés particulières, que ne possèdent pas les huiles minérales, sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population. Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

- Les huiles silicones;
- Les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB ;
- Les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques (par opposition aux esters naturels ou huiles végétales).

Les huiles esters synthétiques sont obtenues à partir d'un tétralcool (pétaérythriol) ou d'un mélange d'acides monocarboxyliques contenant de 7 à 9 carbones (Figure I.3).

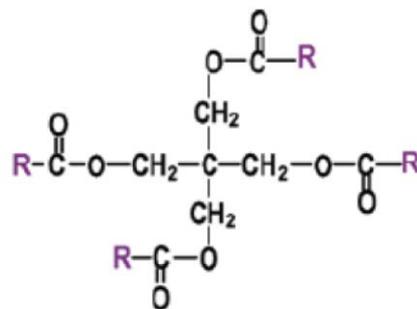


Figure I.3. Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée [2].

Un des principaux atouts de ce type d'huiles est la haute concentration d'eau qu'elles peuvent contenir comparées aux autres huiles isolantes [6]. L'autre avantage des huiles esters synthétiques est leur bonne biodégradabilité comparée à l'huile minérale ou à l'huile silicone (Figure I.4) [7].

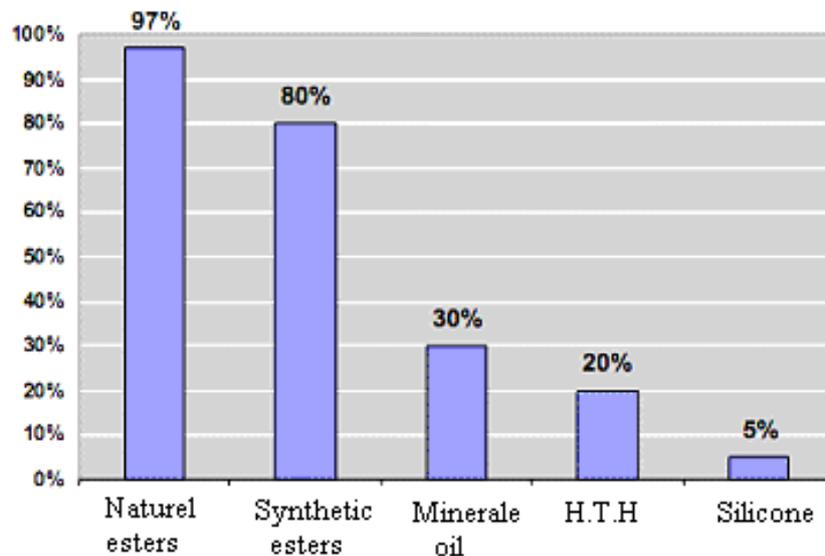


Figure I.4. Comparaison des pourcentages de biodégradabilité des huiles, norme CEC L-33- A-93 [7].

Le point de feu élevé ($>3000^{\circ}\text{C}$) des huiles esters synthétiques représente l'un de leurs principaux avantages comparativement aux autres huiles. Ceci a fait qu'elles sont utilisées dans les appareillages proches de la population tels que les transformateurs de distribution et les dispositifs électriques mis dans les immeubles, les tunnels, etc.

L'un de leurs points faibles c'est leur viscosité un peu élevée et qui devient très importante aux basses températures. L'autre point faible concerne leur stabilité au gassing. Une étude faite par Dumke et al. [8] a mis en évidence leur mauvaise stabilité avec une forte production de gaz en comparaison avec d'autres types d'huile.

1.2.2.3. Huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique ; la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est $\text{R-COO-R}'$. Les huiles végétales portent aussi le nom d'esters naturels ou d'huiles végétales (par opposition aux esters synthétiques ou organiques) car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le tournesol, le colza, le soya....

Un des grands atouts de ces huiles est leur excellente biodégradabilité qui malheureusement en contrepartie leur confère une grande sensibilité à l'oxydation [7]. De ce fait, leur usage est limité aux appareillages électriques scellés qui ne sont pas respirant, c'est à dire sans communication avec l'atmosphère, où cette sensibilité est compensée avec des antioxydants dont les propriétés environnementales sont mauvaises (produits "non verts"). Leurs autres atouts sont leur faible inflammabilité et leur grande capacité à absorber l'eau (grande solubilité de l'eau), comme les esters organiques, comparés aux huiles minérales. Outre ces deux avantages, ce type d'huile présente une viscosité plus élevée que les huiles minérales (Figure I.2) et notamment un point d'écoulement assez haut (aux alentours de -20°C), ce qui limite le transfert de chaleur et restreint leur usage dans les pays où le climat n'est pas trop froid. Enfin, les huiles végétales neuves ont des propriétés électriques voisines de celles des huiles minérales, bien que leur résistivité soit moins élevée [4].

I.3. Propriétés électriques des huiles isolantes

Comme tout autre matériau ou composé, les liquides diélectriques possèdent des caractéristiques électriques qui dépendent surtout de leur formulation (composition, structure moléculaire etc....) et de leur condition d'utilisation ou de conditionnement (élimination de tout ce qui ne constitue pas le liquide tel que résidus de synthèse, particules, gaz et molécules d'eau).

I.3.1. Permittivité électrique

La permittivité diélectrique d'un milieu ou d'un matériau est une caractéristique macroscopique fondamentale qui décrit la réponse de ce dernier vis-à-vis de l'existence d'un champ électrique. Elle peut être trouvée par le biais de l'expression suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

Où ε : représente la permittivité du milieu en (F/m).

ε_0 : représente la permittivité du vide (8.85 pF/m).

ε_r : représente la permittivité relative du milieu (sans unité).

La permittivité relative d'une huile peut être définie comme étant le rapport de la capacité d'un condensateur rempli de cette huile (C_p) et celle du même condensateur vide (C_0)

$$\varepsilon_r = C_p / C_0$$

La permittivité est une caractéristique intrinsèque de l'huile car elle dépend essentiellement de sa structure chimique et caractérise la polarité de ses molécules. Elle permet donc de distinguer les huiles polaires ($\varepsilon_r > 2.5$) des huiles non polaires ($1.5 < \varepsilon_r < 2.5$) comme l'huile minérale.

De façon générale la permittivité électrique n'est pas constante, elle décroît avec l'augmentation de la température et/ou de la fréquence du champ électrique appliqué. Elle varie aussi en fonction de la position, de l'humidité et d'autres paramètres. La contrainte électrique la plus élevée est toujours supportée par le milieu de plus faible permittivité relative. Cette dernière est en général comprise entre 2 et 5 pour les huiles diélectriques utilisées dans les applications industrielles.

I.3.2. Résistivité/Conductivité

Un matériau est d'autant plus isolant (ρ la plus élevée possible) qu'il bloque le passage du courant quand il est soumis à une tension électrique et inversement. La résistivité (ρ) est une propriété qui dépend non seulement de la structure intrinsèque de l'huile (structure moléculaire), mais qui dépend aussi très fortement du conditionnement de cette dernière. Elle est donc très influencée par la présence de particules étrangères considérées comme imputés (poussières, gaz, humidité, et autres...). Cette présence peut avoir un effet même si elle n'est qu'en faibles quantités de quelques ppm. La résistivité d'une huile dépend aussi d'autres paramètres tel que la température figure (I.5) qui plus elle augmente plus la résistivité diminue (à plus grande température la mobilité des ions est plus élevée et par conséquent la conductivité de l'huile l'est aussi).

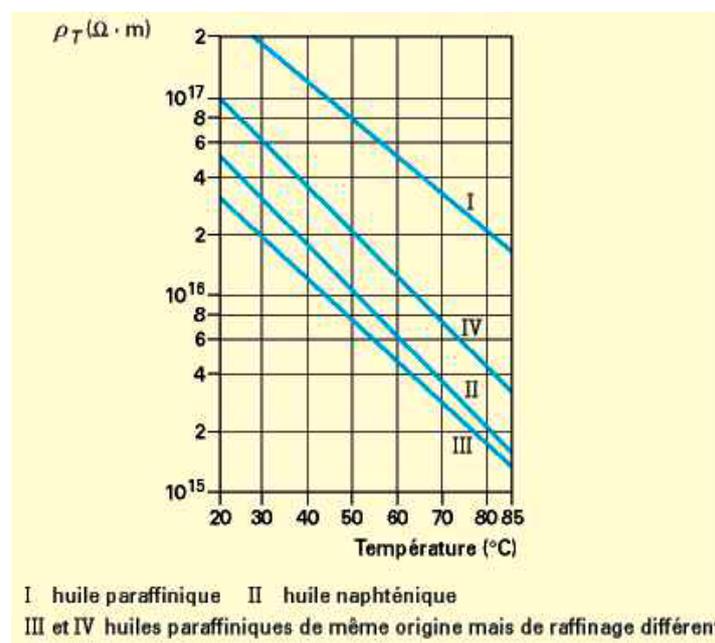


Figure I.5. Variation de la résistivité de différentes huiles minérales en fonction de la température (en courant continu) [9]

En général, les résistivités des huiles utilisées en industrie ont des ordres de grandeur compris entre 10^{11} et 10^{17} $\Omega \cdot m$, et la plupart des spécifications des produits donnent des résistivités à 90° C.

I.3.3. Facteur de dissipation

Le facteur de dissipation ou facteur de pertes ($\tan(\delta)$) est une valeur sans dimension qui est intimement liée aux deux propriétés précédentes (permittivité et résistivité) sous tension alternative, et qui peut être exprimé en fonction des éléments (résistance R en parallèle à un condensateur C) du schéma électrique équivalent des pertes comme suit [10] :

$$\tan(\delta) = 1/RC\omega$$

Pour un isolant parfait ($\sigma = 0$) le déphasage (φ) entre la tension appliquée et le courant résultant est égale à $(\pi/2)$, mais pour un isolant réel ce déphasage se trouve réduit d'un angle (δ) tel que ($\varphi + \delta = \pi/2$) appelé angle de perte. Le facteur de dissipation se définit comme étant justement la tangente de cet angle de perte. Donc les pertes diélectriques seront d'autant plus élevées que cet angle est grand figure (I.6).

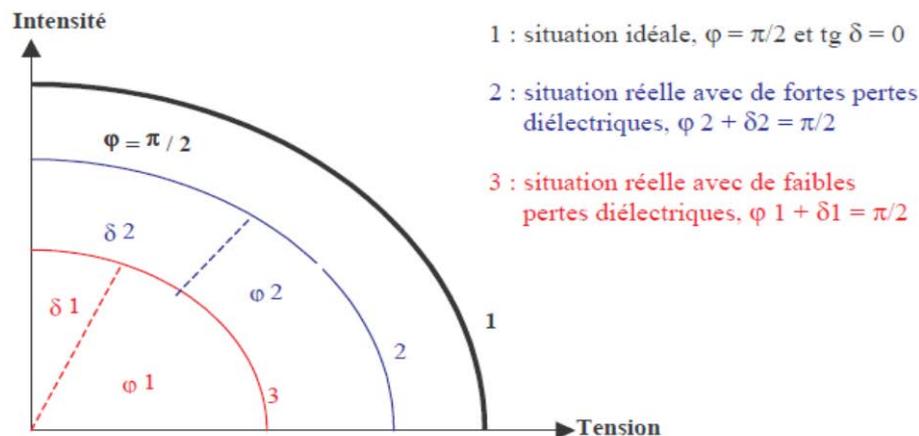
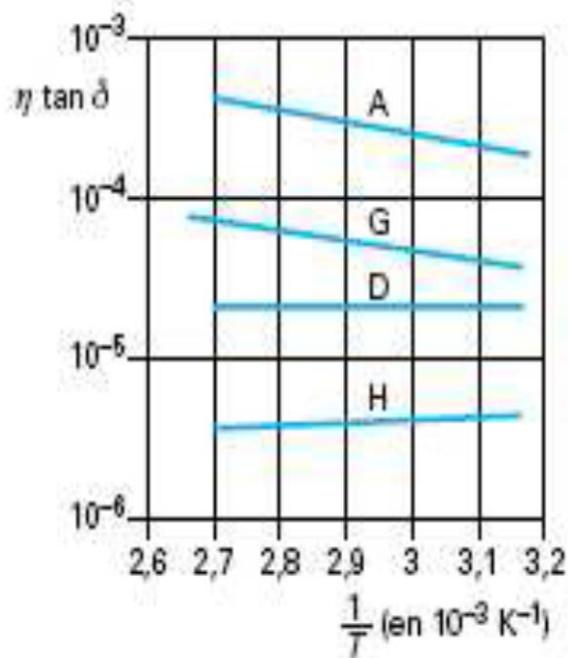


Figure I.6. Schéma représentatif de l'angle de perte

Tout comme la résistivité, le facteur de forme croît avec l'augmentation de la température qui cause aussi une diminution de la viscosité (η) [11] comme montré sur la figure (I.7).

Il est clair que ($\tan(\delta)$) qui renseigne sur la qualité de l'isolant est aussi très sensible à la présence des impuretés. Des essais de vieillissement accélérés (sous l'action de la température et de l'oxygène) ont révélé une corrélation entre l'évolution de $\tan(\delta)$ et quelques paramètres tels que l'acidité et les dépôts [12] et aussi l'oxydation de l'huile (donc la consommation d'oxygène) [13] comme le montre la figure (I.8).



A huile pour câbles G huile pour transformateurs
 D et H huiles blanches (huiles de paraffine)

Figure I.7. Variations du produit ($\eta \cdot \tan(\delta)$) en fonction de l'inverse de la température absolue pour quatre huiles différentes [11]

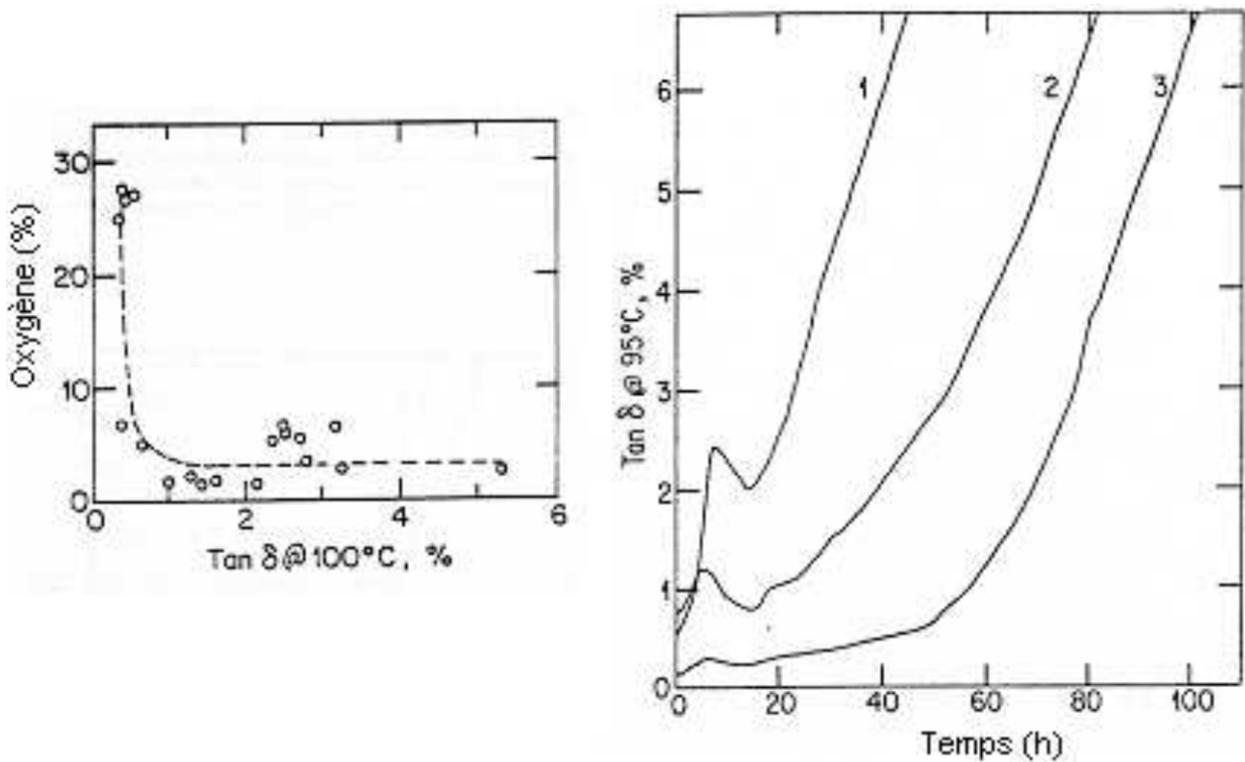


Figure I.8. Variations du taux d'O₂ dans l'huile en fonction de $\tan(\delta)$ à gauche et variation de $\tan(\delta)$ en fonction du temps d'oxydation pour trois huiles différentes à droite [9]

Dans l'industrie $\tan(\delta)$ est souvent pris comme un critère de vieillissement des huiles. Au maximum, pour une huile neuve bien traitée, il est de l'ordre de 2 à $5 \cdot 10^{-4}$ à 90°C et peut atteindre au fil du temps des valeurs très élevées supérieures à 1 .

I.3.4. Rigidité diélectrique et tension de claquage

La rigidité diélectrique (E_c) d'un matériau est définie comme étant la valeur maximale du champ électrique qu'on peut lui appliquer sans que l'isolation ne soit perdue. C.à.d. avant l'apparition d'une décharge à l'intérieur du matériau qui se termine par un arc électrique. Nous pouvons la retrouver à partir de la relation suivante.

$$E_c = U_c / D$$

Où E_c : rigidité électrique en (kV/mm)

U_c : tension de claquage en (kV)

D : distance inter-électrode en (mm)

En général, en industrie, on considère surtout la tension de claquage quand on veut parler de la tenue diélectrique d'un matériau. De ce point de vue, les liquides occupent une position intermédiaire entre les solides et les gaz. Les solides ont bien sûr la tension de claquage la plus forte alors que les gaz possèdent la plus faible. Par exemple la tension de claquage à 50 Hz , à pression atmosphérique entre des électrodes sphériques de diamètre 12.5 mm distantes de 2.5 mm est d'environ 6 kV pour l'air, 50 à 100 kV pour les huiles diélectriques et supérieurs à 200 kV pour les solides [14].

Il est tout à fait clair que la valeur de la tension de claquage d'une huile donnée dépend d'une multitude de paramètres parmi lesquels nous pouvons citer la géométrie des électrodes, leurs dimensions et leurs état de surface, le temps d'application et la nature de la tension, la température et la pression mais aussi et surtout de la présence d'impuretés dans l'huile (particules solides, bulles de gaz etc...). Les mesures répétées plusieurs fois (dans les mêmes conditions) de la tension de claquage d'une huile donnent des valeurs qui changent d'un essai à un autre. Ceci est principalement du aux impuretés dont la présence ne peut jamais être parfaitement contrôlée malgré un bon traitement de l'huile, et en plus elle varie pendant l'utilisation de cette dernière.

I.3.5. Tendances à l'électrisation statique

Le problème d'électrisation de l'huile dans les grands transformateurs de puissance est apparu au début des années 1970 suite au claquage d'un certain nombre d'appareils peu de temps après leur mise en service. Des études [15- 17] ont montré que ces claquages étaient dus à l'apparition de charges électrostatiques créées par la circulation trop rapide de l'huile entre les enroulements des appareils. L'accumulation de ces charges dans certaines zones mène vers l'apparition d'un champ électrostatique qui se superpose au champ électrique alternatif de fonctionnement. Des décharges partielles glissantes, voir même des arcs électriques, peuvent alors avoir lieu entraînant le claquage du transformateur.

Il est à noter que la tendance à l'électrisation dépend non seulement de l'huile elle-même (type, qualité, traitement etc....) mais aussi d'autres facteurs tels que

- le papier utilisé (interaction électrostatique entre les deux)
- la vitesse d'écoulement de l'huile
- la température et l'humidité

I.4. Propriétés liées au transfert de chaleur

Une bonne huile doit non seulement avoir les caractéristiques électriques adéquates, pour mener à bien sa fonction d'isolation, mais aussi d'autres propriétés, tout aussi importantes, qui lui permettent d'accomplir correctement son autre rôle, non moins important, de caloporteur qui permet de garder le transformateur à des températures acceptables de fonctionnement.

I.4.1. Viscosité et point d'écoulement

I.4.1.1. Viscosité dynamique

La viscosité d'un fluide (contraire de la fluidité) est une grandeur qui définit la résistance du fluide à un écoulement uniforme et sans turbulence. Plus précisément, elle résulte de la résistance qu'opposent les molécules du fluide à des efforts qui tendent à les déplacer par glissements relatifs en son sein. Nous pouvons distinguer deux catégories de fluide : fluides newtoniens et fluides non newtoniens. Si, à température constante, la viscosité d'un fluide reste constante quand la valeur de la contrainte change, ce fluide est dit newtonien, et si au contraire elle varie avec la contrainte il est dit non newtonien. Les huiles de transformateurs sont de type newtonien.

La viscosité des fluides (η) (contrairement aux gaz) diminue avec la température. Parmi les lois empiriques existantes, on utilise généralement celle de Vogel, Fulcher, Tamman et Hesse (VFTH) [9, 10].

$$\text{Lg}(\eta) = A + [B/(T - T_0)]$$

Où : A et B sont deux constantes positives caractéristiques du liquide

T est la température en ($^{\circ}\text{K}$) et $T_0 = 273.15 \text{ K}$

I.4.1.2. Viscosité cinématique

Plus facile à déterminer que la viscosité dynamique, la viscosité cinématique (ν) est celle qui est utilisée pour la caractérisation des huiles de transformateurs. Cette grandeur se détermine suivant la norme ISO 3104 [18], et à température donnée elle s'exprime comme suit :

$$\nu = \eta / m_v$$

Où ν : est la viscosité cinématique (m^2/s)

η : est la viscosité dynamique (Pa.s)

m_v : est la masse volumique du liquide (Kg/m^3)

La viscosité cinématique des huiles s'exprime généralement en (mm^2/s) et constitue un critère important pour le transfert de chaleur dans les transformateurs. Toute petite variation sur sa valeur peut entraîner une considérable perte de dissipation de chaleur figure (I.9).

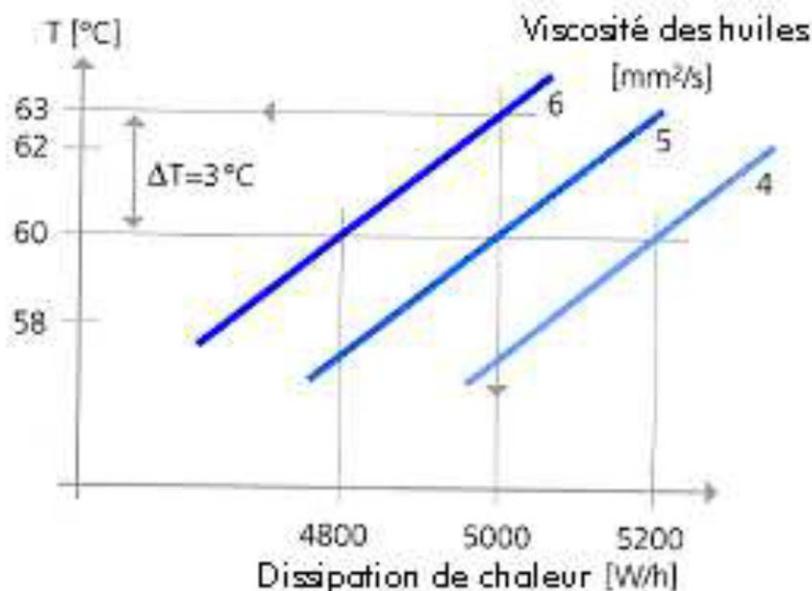


Figure I.9. Evolution de la dissipation de chaleur dans un transformateur en fonction de la viscosité cinématique [19]

De plus, la viscosité cinématique a des valeurs très fortement dépendantes de la température. La figure (I.10) montre la très rapide baisse de la viscosité (ν) lorsque la température augmente.

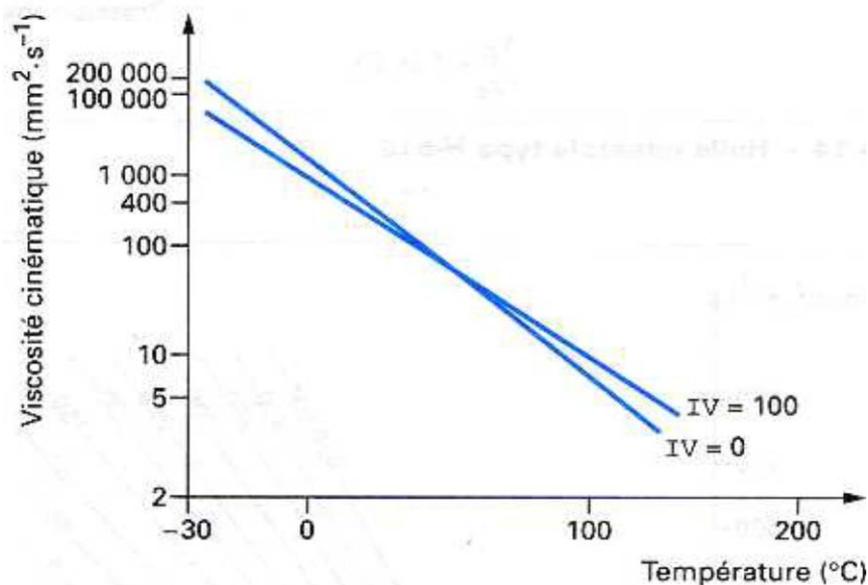


Figure I.10. Variations de la viscosité (ν) en fonction de la température pour différents indices de viscosité (IV) [20]

La viscosité des hydrocarbures est liée à leur masse moléculaire et donc à leur point éclair. La viscosité d'un produit est d'autant plus faible que ce dernier est léger, mais ceci signifie en même temps que le produit est d'autant plus volatile donc plus inflammable. Faut-il donc chercher un compromis ?

I.4.1.3. Point d'écoulement

C'est un critère important dans le choix du liquide diélectrique approprié à un transformateur donné surtout dans les pays froids. Le point d'écoulement est défini comme étant la plus petite température pour la quelle le liquide coule encore (à plus basse température l'huile se fige). Il est intimement lié à la composition de l'huile et à sa masse moléculaire. En général, les liquides utilisés en électrotechnique ont un point d'écoulement variant de -60 à -300 $^{\circ}\text{C}$.

I.4.2. Conductivité et capacité thermique

La capacité thermique massique ou chaleur spécifique est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré kelvin la température d'un kilogramme d'une matière sans qu'il n'y ait de changement de phase. Donc un transformateur chauffe moins avec une huile de capacité thermique élevée. La valeur de cette dernière dépend à la fois de la température et la masse volumique du liquide. Pour les huiles minérales, nous avons la relation de dépendance suivante [10].

$$C_p = (1684 - 3.39.T) / \sqrt{m v_{15}}$$

Où C_p : est la chaleur spécifique (J/kg.K)

$m v_{15}$: est la masse volumique à 15°C

Pour les liquides isolants (C_p) peut varier entre 1000 et 2300 J/Kg.K

La conductivité ou conductibilité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement d'un matériau lors du transfert thermique par conduction en régime permanent. Notée (λ) elle représente l'énergie (ou la quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de (10 °C) entre deux isothermes distantes d'un mètre. Pour la plupart des liquides elle se calcul en appliquant la formule suivante [10].

$$\lambda = 0.117(1-5.4.10^{-4}. T)/d_{15}$$

ou λ : est la conductivité thermique en (W/m.K)

d_{15} : est la densité à 15°C

λ , pour les huiles isolantes, prend des valeurs allant de 0.1 à 0.16 W/Kg.K.

I.4.3. Masse volumique et coefficient de dilatation

La masse volumique (ρ_T) d'une substance donnée est le rapport entre la masse (M) d'une quantité de cette substance et le volume (V_T) qu'elle occupe à la température T.

$$\rho_T = M / V_T$$

La masse volumique diminue quand la température augmente. Cette variation est caractérisée par le coefficient de dilatation volumique (α_v) comme montré par la relation suivante [10].

$$\rho_T = \rho_{20} (1 - \alpha_v (T - 20))$$

A 20°C, la masse volumique des huiles isolantes n'est pas très loin de 1000 KG/m³. Il est bien sur préférable que la masse volumique des huiles utilisées soit plus faible que celle de l'eau pour que cette dernière ne vienne pas à la surface de l'huile où elle pourra causer l'apparition d'arcs électriques. Le coefficient de dilatation des huiles peut varier entre 5.10^{-4} et 10.10^{-4} K⁻¹.

I.4.4. Point d'éclair et point d'inflammation

Le point d'éclair (ou d'inflammabilité) correspond à la température la plus basse à laquelle un corps combustible émet suffisamment de vapeur pour former avec l'air ambiant un mélange

gazeux qui s'enflamment au contact d'une flamme pilote mais pas suffisamment pour que la combustion s'entretienne d'elle-même. Pour que ceci soit le cas, il faut que la température atteigne le point d'inflammation quand la flamme pilote est nécessaire, sinon nous parlons de point d'auto-inflammation. De façon générale, pour que le risque d'incendie soit négligeable, il faut que l'écart entre la température de travail et le point éclair soit d'au moins 25 à 30°C [14].

I.5. Cause vieillissement de des huiles isolantes

Les principaux agents présents dans les transformateurs, susceptibles de dégrader les huiles isolantes (et la cellulose), sont l'oxygène et l'humidité. L'oxygène est présent sous forme dissoute dans l'huile et l'humidité est présente dans le papier (même après séchage, il reste de l'humidité, supérieur à 0.2% en masse). Ces sources de vieillissement sont d'autant plus présentes dans le cas des transformateurs de puissance, qui sont dits « respirants ». L'oxygène et l'humidité amènent respectivement la dégradation de l'huile par oxydation et hydrolyse. A ces deux facteurs de vieillissement « naturel » s'ajoutent deux autres catalyseurs non négligeables qui sont la température (pyrolyse) et le champ électrique. Enfin, la présence des matériaux de construction de l'appareil, tels que le fer, le cuivre ou la cellulose viennent s'ajouter aussi comme catalyseurs de vieillissement. La figure (I.11) résume succinctement le mécanisme de dégradation des isolants électriques des transformateurs de puissance.

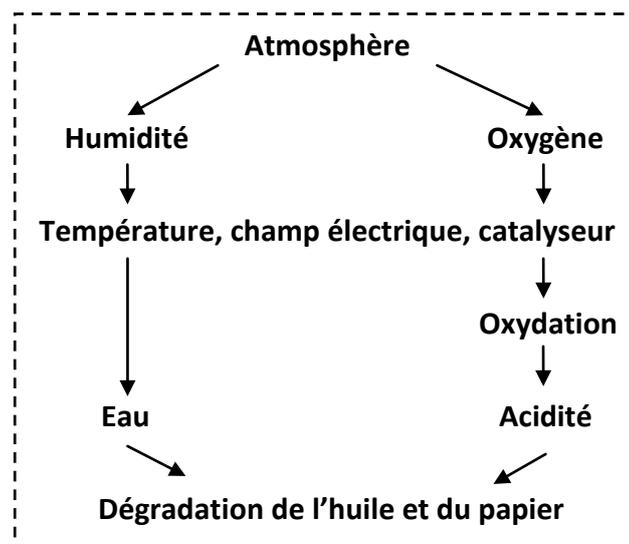


Figure I.11. Synthèse du mécanisme principal de dégradation des isolants électriques dans un transformateur de puissance dit « respirant » [2]

I.5.1. Oxydations de l'huile minérales

I.5.1.1. Mécanisme et conséquences

L'oxydation de l'huile minérale résulte principalement de l'action simultanée de l'oxygène moléculaire et de la température en présence des matériaux de construction des appareils (cuivre, fer, cellulose, etc.). L'action de l'humidité et du champ électrique sur le phénomène d'oxydation est encore mal connue.

L'oxydation constitue le facteur prédominant dans le vieillissement des isolants liquides, et plus particulièrement dans celui des huiles minérales. On désigne ainsi un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous [21]. Les huiles comme tous produits naturels s'oxydent en donnant des produits de dégradation qui se caractérisent d'abord par une évolution de la couleur et de l'odeur, liée à la formation de composés acides légers, puis par une apparition de dépôts et de résidus agressifs, liée aux acides lourds, qui obstruent les circuits de refroidissement et accompagnée en général d'une augmentation de la viscosité.

L'oxydation des huiles minérales croît avec la température et la concentration en oxygène. La vitesse de réaction double approximativement tous les 8° à 10°C, à partir de 60°C [22].

Duval et Crine [23] ont mis en évidence l'augmentation de $\tan \delta$ et l'oxydation de l'huile. Meshkatoddini [24] a mis en évidence le fait que l'acidité évoluait de façon significative avec le vieillissement du transformateur et l'oxydation de l'huile, en la mesurant sur neuf transformateurs de puissance différents (figure I.12).

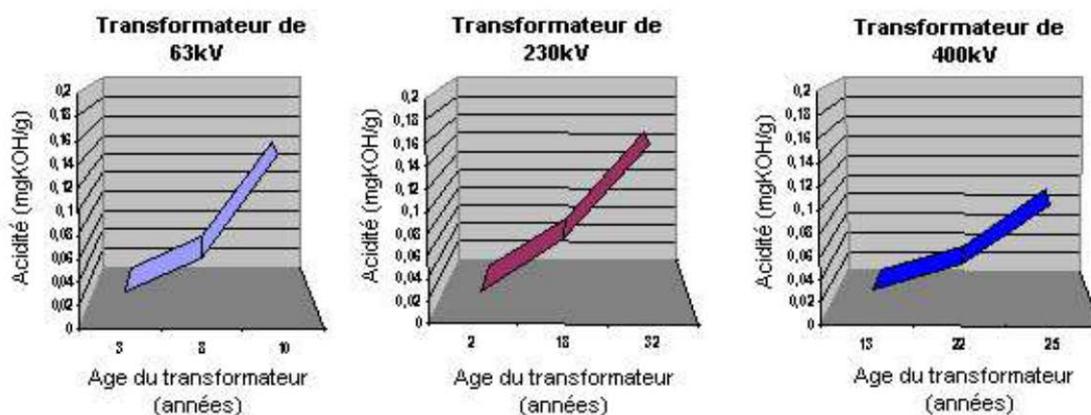


Figure I.12. Evolution de l'acidité en fonction du temps pour neuf transformateurs de puissance en service [23]

Ainsi, pour résumer, on peut dire que les conséquences de ce phénomène d'oxydation de l'huile sont :

- Une augmentation de $\tan \delta$ et de l'acidité
- Une augmentation de la viscosité liée aux boues d'oxydation, d'où une diminution de la capacité à éliminer les calories
- Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose et des parties métalliques, liée à la formation d'acides carboxyliques et l'augmentation d'acidité.
- Une augmentation de la teneur en eau liée à l'oxydation.

1.5.1.2. Inhibiteurs d'oxydation

Comme nous avons vu précédemment, l'oxydation de l'huile minérale est un phénomène auto catalytique, initié par les radicaux libres. Les additifs inhibiteurs d'oxydation (antioxydants) ont pour rôle de bloquer les radicaux libres formés de façon intermédiaire dans la réaction en chaîne d'oxydation. Les additifs les plus courants sont de type phénol comme le DBPC, et leur teneur varie de 0.1 à 0.4% en masse dans l'huile. L'utilisation d'antioxydant a été longtemps sujette à controverse par rapport aux effets néfastes que ces derniers pouvaient avoir sur le papier, ou bien un vieillissement accéléré lorsque l'antioxydant était consommé. De nombreuses recherches ont prouvé le contraire [25].

1.5.2. Humidité

L'humidité est « l'ennemi numéro un » [25] des isolants électriques, dans le sens où contrairement à eux, elle conduit l'électricité. Ce phénomène est d'autant plus prononcé dans les huiles isolantes car ces dernières ont une faible solubilité de l'eau. On parle souvent de phénomène d'hydrolyse pour définir l'influence de l'eau sur le vieillissement de l'huile.

Avant le remplissage du transformateur, l'huile est séchée pour atteindre une faible teneur en humidité (ou teneur en eau). A partir de ce moment, cette teneur en humidité va continuellement augmenter pour différentes raisons. Les deux principales sources d'augmentation de la teneur en eau de l'huile sont la pénétration de l'humidité provenant de l'atmosphère et la dégradation de la cellulose. La pénétration d'humidité provenant de l'atmosphère vient du fait que les transformateurs de puissance sont souvent respirants. La dégradation de la cellulose apporte de l'eau car bien que cette dernière soit séchée, il subsiste toujours au moins 0.2% en masse d'humidité en son sein.

1.5.2.1. Teneur en eau

L'eau peut être trouvée dans l'huile sous forme dissoute dispersée (gouttelettes d'eau) ou en émulsion (apparition de deux phases non miscible). La solubilité W_s de l'eau dans l'huile est donnée en mg /kg ou ppm. Elle dépend de l'état de l'huile, de la température et du type d'huile. La variation de la solubilité de l'eau dans l'huile est exprimée par [27] :

$$W_s = W_{oil} \cdot e^{(-B/T)}$$

Où W_s : est la solubilité de l'eau dans l'huile (mg/kg ou ppm).
 W_{oil} et B sont des constantes propres au liquide.

Plus la température augmente et plus la solubilité de l'eau dans l'huile est importante. Cette variation de solubilité avec la température peut se révéler comme problématique. En effet, lorsque l'appareil est chaud, l'eau peut se dissoudre en plus grande quantité, et lorsque l'appareil refroidit la solubilité de l'eau diminuant à nouveau peut laisser apparaître de l'eau libre. Ainsi, il convient toujours de déterminer la solubilité de l'huile à la même température que celle à laquelle l'huile a été prélevée. Au contact d'une atmosphère humide, l'eau se dissout peu à peu dans l'huile. C'est pourquoi les transformateurs dits « respirants » sont toujours munis d'un dessiccateur pour assécher l'air.

1.5.2.2. Interaction papier/huile

L'huile est utilisée dans les transformateurs comme imprégnant d'isolants cellulose tel le papier Kraft. L'Humidité entre l'huile et le papier est le résultat d'interactions continues qui évoluent en fonction de la température.

Fabre et Pichon [28] ont mis en évidence cet équilibre entre les deux matériaux. On peut alors voir que l'humidité du papier a tendance à diminuer avec la température alors que celle de l'huile augmente (la solubilité de l'eau augmente avec la température).

1.5.3. Autres causes de vieillissement

1.5.3.1. Température

Comme on l'a vu précédemment, la température agit comme un catalyseur d'oxydation. C'est aussi un facteur qui dégrade peu à peu les huiles isolantes. On parle souvent de stabilité thermique pour définir le comportement du produit à température élevée, en faisant abstraction de toute autre contrainte telle que l'oxydation, l'hydrolyse ou les décharges partielles.

L'effet de la température sur le vieillissement d'une huile est souvent défini comme la pyrolyse. Dans les conditions normales d'utilisation des transformateurs (température située entre 80 et 100 °C), la stabilité des liquides isolants existants est largement suffisante.

La température agit donc principalement comme catalyseur et non comme déclencheur. Cependant, il peut y avoir des points chauds dans certaines parties du transformateur qui dégradent l'huile.

1.5.3.2. Décharges partielles

Sous l'effet d'un champ électrique intense, auquel sont soumises les huiles isolantes à l'intérieur des différents dispositifs, des micro-décharges peuvent apparaître au sein des huiles. Ces dernières ont un effet très néfaste sur la durée de vie des installations haute tension à cause de la multitude de phénomènes destructeurs d'isolation qui les accompagnent.

Les décharges partielles sont à l'origine entre autre de :

- Réactions chimiques qui dégradent les huiles par oxydation et qui génèrent des gaz pouvant être dangereux et favorisant la multiplication des micro-décharges.
- L'augmentation du taux d'humidité dans les huiles.
- L'élévation de la température locale.

En d'autres termes les décharges partielles causent l'apparition de pratiquement tous les éléments physicochimiques, précédemment cités, responsables du vieillissement des huiles. Elles sont donc considérées comme étant l'une des causes, le moins qu'on puisse dire, les plus influentes dans l'accélération de ce vieillissement. C'est pour cette raison que ces décharges ont fait, et continuent à faire, l'objet de nombreux travaux de recherche. Justement le présent travail s'inscrit dans ce cadre.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales propriétés des différents types d'huiles diélectriques utilisés dans l'appareillage électrique et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance. Il apparaît que l'utilisation d'une huile isolante dans un transformateur de puissance ne peut être envisagée que si cette dernière remplit certains critères dont les principaux sont : une bonne tenue diélectrique, un faible facteur de pertes (ou de dissipation), un bon point d'écoulement (faible viscosité) pour assurer un bon transfert de chaleur, une bonne résistance au feu, une stabilité à l'oxydation et une faible tendance à la charge statique.

Les huiles esters se démarquent avec leur forte capacité à absorber l'humidité (haute solubilité de l'eau). La différence entre les esters synthétiques et les esters naturels se situe au niveau de leur stabilité à l'oxydation et de leur point d'écoulement. Les esters naturels qui sont facilement biodégradables ont une faible tenue à l'oxydation et se figent à des températures beaucoup plus hautes. Les huiles silicones quant à elles, ont une très bonne stabilité à l'oxydation mais ne sont pas biodégradables.

Néanmoins, de nombreux problèmes récents, liés à la corrosivité des huiles minérales remettent en question leur règne et orientent peu à peu les constructeurs de transformateurs à se diriger vers les esters qui en plus de leurs bonnes propriétés, n'ont pas ce problème et sont moins nocives pour l'environnement et les hommes.

Les principales causes de vieillissement à savoir l'oxydation des huiles, l'humidité et la température ont aussi été passées en revue. Il est à noter que les décharges partielles qui se produisent au sein des huiles qui remplissent les dispositifs de puissance sous haute tension sont responsables d'une grande accélération de ce phénomène de vieillissement et par conséquent d'une sérieuse diminution de la durée de vie de ces installations électriques très coûteuses. C'est pour cette raison que le présent travail a pour objet l'étude de quelques aspects de ces complexes phénomènes de décharges partielles.

Chapitre II

Phénomènes des décharges partielles

II.1. Introduction

L'emploi simultané de techniques de mesure, de visualisation et d'enregistrement des phénomènes électriques et optiques ultrarapides, a permis de progresser dans l'identification et l'interprétation des différents mécanismes prenant naissance au sein des diélectriques liquides lorsque ceux-ci sont soumis à des champs électriques intenses. En effet, grâce à ces techniques, il est devenu possible de suivre les différentes étapes conduisant au claquage et d'établir que le claquage dans les liquides, dans une géométrie divergente (pointe – plan, par exemple) est généralement précédé par des phénomènes appelés “streamers” dont l'indice de réfraction est différent de celui du liquide environnant et dont la structure (arborescente) est similaire à celle observée dans les diélectriques solides et dans les gaz. Contrairement aux décharges dans les gaz, le terme streamer dans les diélectriques liquides inclut également d'autres structures de décharges comme la forme mono-canal. Les termes “streamer” et “leader” ont été utilisés dans le passé (avant les années 60 du siècle dernier) et certains auteurs les emploient à nouveau pour décrire les décharges dans les grands intervalles d'huile [2].

On distingue généralement deux phases dans le pré-claquage:

- (i) une phase d'initiation correspondant à l'apparition d'une perturbation (de quelques μm de diamètre) caractérisée par un indice de réfraction différent de celui du liquide environnant, au voisinage de l'électrode acérée (dans un système d'électrodes pointe – plan, par exemple). L'instabilité à la surface de cette perturbation conduit à la génération de structures plus ou moins ramifiées: le streamer.
- (ii) une phase de propagation du streamer vers l'électrode opposée dont l'issue est généralement fatale: l'arc [29, 30].

II.2. Phase de génération : génération d'une bulle de gaz

Il a été clairement établi, et ce dans de nombreux liquides sous différents types de tensions (AC, DC ou impulsionnelle), que la perturbation observée dans la phase de génération est une bulle de gaz résultant d'un échauffement local du liquide [29-31]. Notons que la génération de cette bulle de gaz est toujours la conséquence d'une injection de courant. Sa génération suit les toutes premières impulsions de courants enregistrés lorsque la tension est augmentée progressivement. Chaque impulsion de courant résulterait d'une avalanche électronique en phase liquide [32, 33]. L'atténuation d'un faisceau lumineux (rayon laser d'une dizaine de μm de diamètre) éclairant le voisinage de la pointe, avec un léger retard par rapport au signal du courant, en est la preuve. Aussi, en polarité positive, les deux signaux (courant et lumière) s'estompent au même instant alors qu'en polarité négative l'atténuation lumineuse persiste au-delà du retour à zéro du courant injecté, démontrant ainsi que la dynamique de la bulle n'est pas la même selon la polarité [31]. Notons que dans certains cas, il peut y avoir apparition d'une impulsion de courant non accompagnée d'atténuation du faisceau lumineux émis par le laser. L'injection de courant n'entraîne donc pas forcément la création d'une bulle. Dans ce cas, il peut s'agir de phénomènes électrohydrodynamiques (EHD).

En admettant que toute l'énergie correspondant au premier pic de courant sert à la vaporisation du liquide, le volume de gaz (vapeur de liquide) calculé pour cette énergie est du même ordre que celui observé expérimentalement [34]. La pression électrique est généralement beaucoup plus élevée que la pression locale du gaz de sorte que l'expansion de la bulle est déterminée par les forces électriques.

II.2.1. Dynamique des bulles

La génération de bulles par des impulsions de courant constitue la première étape du phénomène de streamers. Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, lorsque la tension appliquée est supérieure à une certaine tension dite seuil de génération, une bulle de gaz résultant de l'injection d'une impulsion de courant de forme triangulaire, prend naissance. Une fois atteint son rayon maximum, cette bulle subit une série de cycles expansion/implosion avant de disparaître (Figure II.1) [34, 35].

L'étude de la dynamique d'expansion de la bulle est un problème complexe du fait de la présence de l'onde de choc qui comprime et met en mouvement le liquide derrière elle, ce qui induit une modification du champ de pression à l'interface. En ce qui concerne la phase d'implosion qui lui fait suite, sa dynamique dépend pour beaucoup des caractéristiques du liquide (viscosité en

particulier) et de l'énergie injectée. De plus, la bulle perd une grande partie de son énergie sous la forme d'une émission d'une onde de pression à la fin de chaque phase d'implosion, lorsque son volume est minimal. Quelle que soit la pression appliquée, la durée des rebonds (cycle expansion/implosion) d'une bulle augmente avec la température du liquide [35].

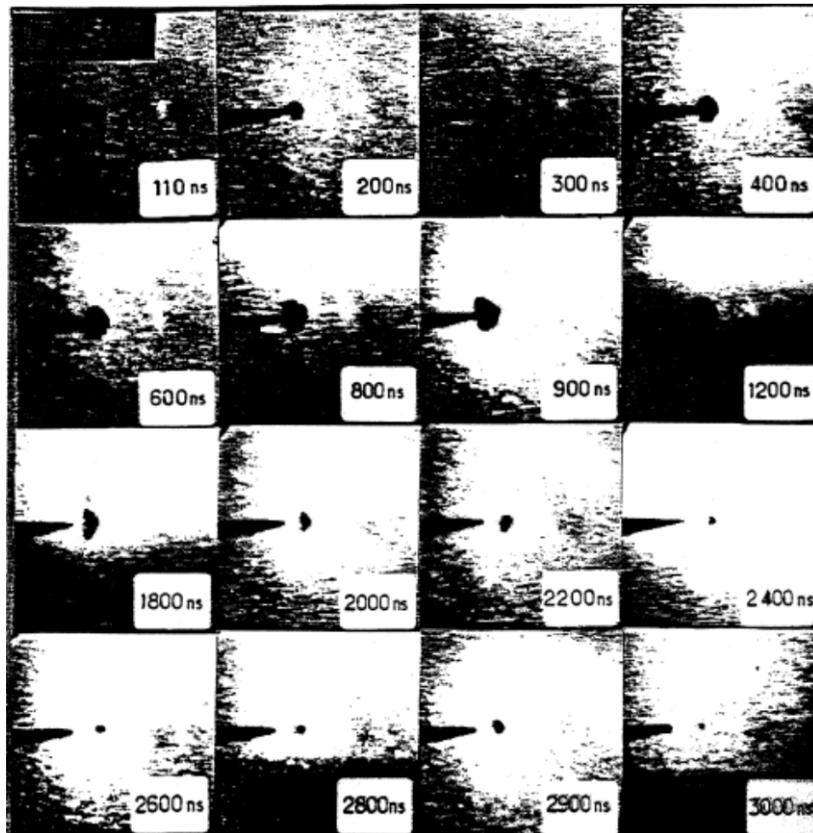


Figure II.1. Visualisation de la dynamique de la bulle (expansion/implosion et rebondissements) en fonction du temps de retard à l'instant initial d'apparition de l'impulsion de courant. (Cyclohexane, $W = 5 \text{ nJ}$, $P_{\infty} = 1.3 \times 10^5 \text{ bar}$) [36]

II.2.2. Paramètres influençant la tension de génération de streamers

Dans le cyclohexane pur, en géométrie pointe-plan, Beroual et al [37] ont observé que la tension de génération croît avec le rayon de courbure de la pointe (Figure II.2) et qu'elle est peu sensible à la distance inter électrode dans la gamme considérée ($0.5 \text{ mm} \leq d \leq 6 \text{ mm}$). Par ailleurs, le champ harmonique déterminé à partir de la tension de génération mesurée expérimentalement varie en rp^{-n} ($1/2 < n \leq 2/3$).

L'addition de produits à bas potentiel d'ionisation ou contenant des halogènes aux liquides industriels augmente la tension de génération [29, 38].

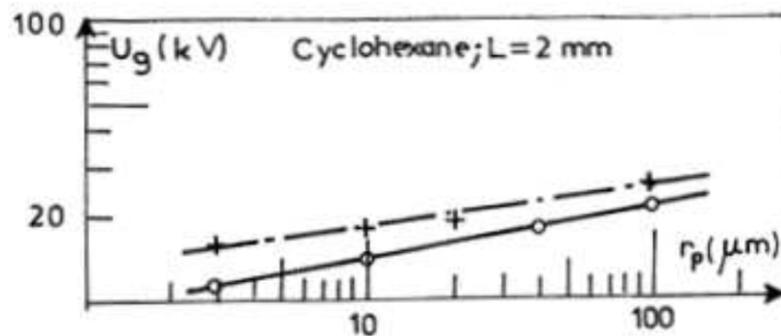


Figure II.2. Tension de génération des streamers dans le cyclohexane en créneau de tension en fonction du rayon de courbure de la pointe en deux polarités : (+) pointe positive, (o) pointe négative [37].

Pour des pressions variables entre 1 et 15 bars, sous tension continue, les tensions de génération, pour les deux polarités, croissent linéairement [29, 39].

II.3. Transition bulle – streamer

Lorsque la tension appliquée augmente bien au-delà de la tension seuil, le nombre et l'amplitude des impulsions de courant augmentent avec la tension [31, 32, 40]. Chaque impulsion de courant correspond à une décharge dans la bulle initiale et entraîne la création d'une quantité supplémentaire de gaz, le contour de la bulle se déforme et son volume augmente, c'est la phase de propagation. A. Larson et M. Bengtsson [41] ont démontré qu'après formation de la bulle gazeuse, les décharges partielles qui s'y développent, provoquent une augmentation de la pression conduisant ainsi au développement de la cavité.

Aka et Beroual [42] ont proposé un modèle mathématique permettant de décrire de façon détaillée la transition bulle – streamers. Ils ont montré que selon les conditions expérimentales, différents modes de déformation de l'interface de la bulle peuvent apparaître et selon ces modes, différents types de streamers (buissons, pagodes, filamenteux ...) peuvent prendre naissance. L'apparition de ces modes dépend énormément des champs locaux aux différents sites de l'interface.

II.4. Propagation des streamers

II.4.1. Mécanisme de formation des streamers et leurs caractéristiques

Il se dégage des théories existantes, deux conceptions différentes concernant la nature et les processus de formation des streamers. La première est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les liquides (comme dans les gaz) donnant lieu à une phase gazeuse ionisée. La

deuxième est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les bulles de gaz résultant d'une vaporisation locale du liquide. Beroual [29, 38] a montré que les mécanismes gazeux (où la bulle sert de détonateur) et électronique ne peuvent agir singulièrement.

L'influence remarquable de la pression hydrostatique sur l'initiation et la propagation des streamers, et l'analyse chromatographique des liquides testés, montrent que la nature physique des streamers est gazeuse. D'autre part, l'action d'additifs spécifiques (capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation), l'effet de la présence d'halogène dans la molécule du liquide sur les streamers et l'analyse spectroscopique de la lumière émise par les streamers indiquent que les processus électroniques sont aussi présents.

Les streamers sont caractérisés par leur forme et leur vitesse. Ils sont accompagnés de courants, d'émissions lumineuses et d'ondes de chocs. Ces caractéristiques dépendent de la composition chimique et des propriétés physiques du liquide (pur ou contenant de faibles concentrations d'additifs spécifiques), de la pression et de la température, de la géométrie des électrodes, de l'amplitude, de la polarité et de la forme de la tension, des contaminants de l'air, de l'humidité, des particules et autres traces d'impuretés présentes. Il existe une corrélation étroite entre ces différentes caractéristiques [29, 43].

Notons que les mesures du champ électrique par effet Kerr montrent que les streamers sont conducteurs avec une chute de tension aux bornes du streamer <10% de la tension totale appliquée aux électrodes [44].

Les formes arborescentes des streamers sont généralement classées en lents et "buissonneux" pour les streamers émanant de l'électrode négative ou rapides et "filamentaires" avec un diamètre typique des filaments de l'ordre de 10 μm pour les streamers émanant de l'électrode positive [29]. Les streamers positifs sont souvent plus rapides que les streamers négatifs (environ 10 fois plus), à l'exception de l'huile de transformateur où les vitesses des streamers positifs et négatifs sont du même ordre. Cette classification selon la polarité a été remise en cause par Beroual [37, 38]. Il a montré en effet que dans les liquides contenant un halogène dans leur molécule, les streamers négatifs peuvent être également filamenteux et très rapides. Notons que certains auteurs classent les streamers positifs en plusieurs modes selon leurs vitesses de propagation ; ils distinguent généralement trois modes consécutifs: 1er, 2ème et 3ème modes de propagation [44, 45].

Dans ce qui suit, nous allons décrire de façon synthétique, l'influence de divers paramètres sur certaines caractéristiques des streamers.

II.4.2. Courant et émission lumineuse accompagnant les streamers

L'amplitude et la forme des courants et des signaux lumineux associés aux streamers dépendent de plusieurs paramètres. En géométrie pointe – plan et pour de faibles intervalles (<5 cm), les signaux de courants et émissions lumineuses des streamers lents du type “buisson” comportent des impulsions rapides, irrégulièrement espacées et dont le nombre et l'amplitude augmentent avec le temps de propagation des streamers et/ou la tension appliquée et/ou lorsque l'intervalle inter électrodes diminue, quelle que soit la polarité (Figure II.3) [29].

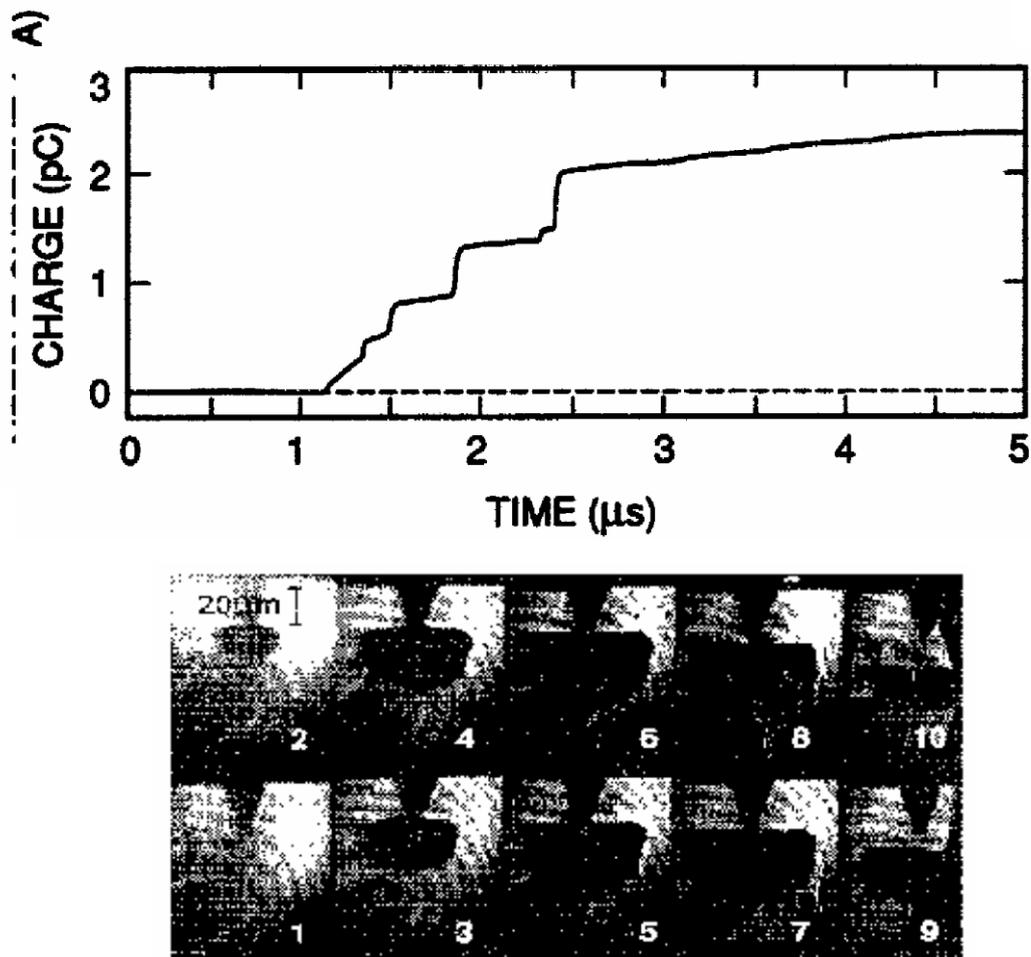


Figure II.3. Enregistrement simultané de l'évolution d'un streamer négatif dans l'hexane avec le courant et la charge correspondante. $U=15.5$ kV ; $d=3.2$ mm ; $r_p=1$ µm. L'intervalle entre images et le temps d'exposition sont respectivement de 512 et 102 ns [46].

Les courants et la lumière émise par les streamers filamenteux rapides présentent une composante continue sur laquelle se superposent d'autres impulsions, de fréquences plus régulières que celles relatives aux streamers lents [47, 48]. Quels que soient la polarité et le liquide testé, le courant des streamers rapides est plus élevé que celui de streamers lents [29]. De façon générale, l'amplitude des courants et l'intensité de la lumière émise augmentent avec la vitesse de propagation des streamers et ce dans les deux polarités.

Comme le courant, la charge électrique dépend de la forme et de la vitesse des streamers [29]. La charge totale des streamers rapides est plus élevée que celle des streamers lents. Plus l'énergie de streamer est élevée, plus sa vitesse est élevée.

II.4.3. Influence des propriétés du liquide

II.4.3.1. Influence de la viscosité et de la masse volumique

La viscosité des liquides n'a qu'une influence très limitée sur la vitesse de propagation des streamers [29, 49]. En effet, l'étude de quatre huiles silicones différentes n'a montré qu'une très légère tendance à la décroissance de la vitesse des streamers lents obtenus en polarité négative avec une géométrie pointe – plan lorsque la viscosité augmente. Des résultats comparables ont été également obtenus en polarité positive.

En ce qui concerne l'influence de la masse volumique, Sakamoto et Yamada [45] ont classé les liquides diélectriques en fonction de leur masse volumique et de la vitesse des streamers positifs. Beroual [38] avait démontré que cette classification n'est pas justifiée car dans les liquides halogénés, la vitesse des streamers positifs et négatifs est plus importante que celle obtenus dans les liquides sans halogènes indépendamment de leurs masses moléculaires.

II.4.3.2. Influence de la structure moléculaire

La structure moléculaire a un effet significatif sur la propagation des streamers. Le principal paramètre affectant la propagation des streamers est l'affinité électronique des molécules du liquide [29]. La présence d'un seul atome de chlore dans le chlorocyclohexane mène à une multiplication de la vitesse des streamers négatifs par un facteur 10 par rapport à celle obtenue dans le cyclohexane pur (où les streamers sont lents et en forme de buisson) [50]. Le streamer est plus filamentaire, donc plus rapide dans le chlorocyclohexane que dans les autres liquides exempts d'halogènes tels que le cyclohexane, le transdécahydronaphthalène et le cis-décahydronaphthalène [40].

Dans la plupart des hydrocarbures saturés (avec un rayon de courbure de l'électrode pointe $>10 \mu\text{m}$), le streamer négatif présente une structure en buisson alors que dans les liquides aromatiques purs (hydrocarbure non saturés), on observe une structure filamentaire [29]. La longueur finale des streamers positifs dans les liquides contenant des liaisons doubles, est plus élevée que celle obtenue dans les liquides hydrocarbures linéaires et saturés [51]. L'influence de la longueur de la chaîne d'hydrocarbure du liquide a été étudiée sous un champ non uniforme dans les hydrocarbures linéaires par [52]. Il a été observé que la vitesse de propagation des

streamers augmente avec la longueur de la chaîne d'hydrocarbure du liquide dans les deux polarités.

Pour les longs intervalles inter électrode, les streamers rapides dans les huiles esters synthétiques apparaissent à des tensions beaucoup plus faibles que pour les huiles minérales [53].

II.4.4. Influence de la pression

Il est connu depuis longtemps qu'une augmentation de la pression hydrostatique améliore de façon importante la rigidité diélectrique d'un liquide. L'influence de la pression sur la rigidité diélectrique diffère selon la polarité. Dans certains liquides, il semble qu'en polarité négative la tension de claquage augmente avec la pression, alors qu'en polarité positive la tension de claquage augmente relativement peu. Les processus gazeux dominent donc en polarité négative plus qu'en polarité positive. [39, 54, 55].

En effet, une pression de quelques bars peut faire disparaître le streamer (Figure II.4). Cependant, il faut beaucoup plus de pression pour les streamers rapides filamenteux que pour les streamers lents en forme de buisson. Des effets similaires ont été également observés sur les courants associés aux streamers ; l'augmentation de la pression réduit la fréquence et l'amplitude des courants associés aux streamers. Au-dessus d'une pression seuil (ou pression de disparition) liée à l'énergie du streamer, les impulsions de courants et de lumière correspondants disparaissent. Aucun effet appréciable n'a été cependant relevé lorsque la pression est diminuée en dessous de la pression atmosphérique [29].

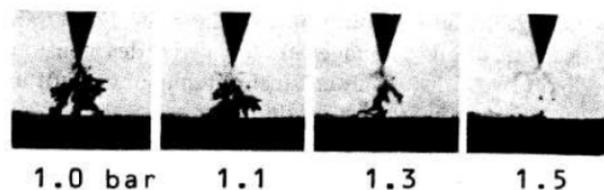


Figure II.4. Streamers négatifs dans le cyclohexane sous l'influence de la pression [55]

II.4.5. Influence de la température

Dans certains liquides, tels que le n-hexane et le cyclohexane, l'augmentation de la température a pour effet d'augmenter la vitesse de propagation des streamers rapides ou encore la probabilité d'apparition des streamers lents [56]. La vitesse des streamers positifs dans le cyclohexane passe de 1.9 à 3 km/s lorsque la température est élevée de 18 à 76°C alors qu'aucun changement dans la tension de génération n'a été relevé dans ce liquide. Seule une légère augmentation du nombre et de l'amplitude des pics de courant et de lumière, a été observée. Par contre, lorsqu'on baisse la

température à une valeur comprise entre -6 et -30 °C, la tension de génération devient beaucoup plus importante qu'aux températures supérieures à $+5$ °C : Elle augmente de 15 à 25 kV en polarité négative et de 17 à 26 kV en polarité positive [57]. En portant l'hexane jusqu'à une température proche de son point d'ébullition, McGrath et Nelson [58] n'ont observé pratiquement aucun effet sur les phénomènes de pré-claquage. La vitesse des streamers positifs passe de 2.3 km/s à seulement 2.7 km/s lorsque la température varie de 5 à 42 °C, celle des streamers négatifs ne subit aucune variation.

II.4.6. Influence de la polarité

En géométrie pointe - plan, l'influence de la polarité se manifeste sur la génération, la forme et la vitesse de propagation des streamers (Figure II.5).

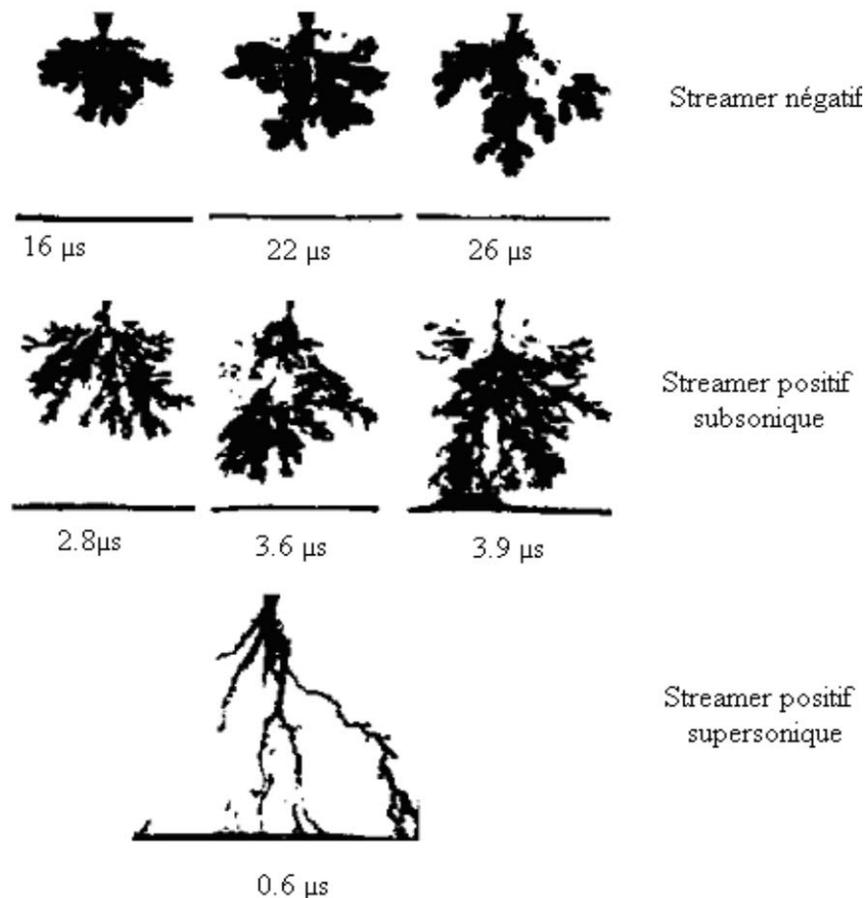


Figure II.5. Types de streamers usuellement observés dans le cyclohexane [40].

♣ **Streamer positif** : lorsque la valeur du champ appliqué est modérée ($2 \text{ MV/m} < E < 12 \text{ MV/m}$), les streamers positifs primaires apparaissent en branches sous forme de “parapluie” [29]. Ils se propagent à une vitesse constante de l'ordre de 2 à 3 km/s. Aux champs très élevés, un streamer très filamentaire donc très rapide (plus 100 km/s), dit streamer positif de 3eme mode peut être observé.

⚡ **Streamer négatif** : les streamers prennent naissance à partir d'un champ à la pointe $E > 2.5$ MV/m sous forme de buisson dont les branches (de diamètre de l'ordre de 30 à 70 μm) se propagent simultanément dans les directions axiale et latérale jusqu'à atteindre l'électrode opposée [29]. Aux valeurs de champ plus élevées, le streamer apparaît sous forme de buisson assez compact et se propage à une vitesse légèrement supérieure à celle des précédents. Lorsque le champ est très élevé, une seule branche (streamer monocanal) atteint l'électrode opposée à une vitesse pouvant dépasser les 100 km/s [29]. Par conséquent, on peut également avoir des streamers très rapides en polarité négative.

II.4.7. Influence de la géométrie des électrodes

La vitesse et le mode de propagation de streamers dépendent énormément du champ électrique, qui est fonction de la tension appliquée, de la géométrie d'électrode (rayon de courbure d'électrode pointe et distance inter électrode) et de la charge d'espace provenant du volume de liquide ou des électrodes (injection). En géométrie pointe – plan, la forme des streamers peut changer avec le rayon de courbure de la pointe. Aux rayons de courbure supérieurs à la valeur critique seuls les streamers en buisson sont observés en pointe négative. Et aux rayons de courbure inférieurs à la valeur critique, les formes de streamers changent de sphérique à hémisphérique, pagode et buisson avec l'augmentation de la tension appliquée [29].

Pour une tension donnée, le temps de retard au claquage augmente linéairement avec la distance inter électrode, alors que l'amplitude, la durée, le nombre et la longueur des streamers diminuent [29, 40].

II.4.8. Analyses spectrale et chromatographique

Les analyses spectroscopiques de la lumière émise par les streamers ont révélé dans le nhexane, la présence d'hydrogène atomique et moléculaire et de carbone (C_2 et C_3) ainsi que des traces de métal provenant des électrodes [59, 60]. Dans le cyclohexane, le mono- dibenzyle-toluène (M/DBT) et le phenylxylyléthane (PXE), il a été observé une formation d'hydrogène aussi bien atomique que moléculaire et des substances carbonées [61]. La formation de ces espèces a été attribuée à la dissociation des molécules du liquide pouvant être engendrée par un mécanisme d'avalanche électronique similaire à celui observé dans les gaz.

Les analyses chromatographiques des gaz dissous, générés par les streamers, dans le PXE et le MDBT ont mis en évidence l'existence de H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 et C_2H_2 . La formation de ces produits a été attribuée à la recombinaison du carbone et de l'hydrogène provenant de la dissociation et la fragmentation des molécules du liquide [61].

II.5. Étude statistique de la tension de claquage

La tension de claquage (qui est mesurée selon des normes dans des géométries d'électrodes bien définies [62, 63]) est une fonction des propriétés physicochimiques de l'huile et des impuretés qui peuvent y être présentes. Comme le claquage est un phénomène aléatoire [64, 65], il est nécessaire d'analyser la reproductibilité des mesures expérimentales sur un certain nombre de tests. Pour ce faire, on utilise diverses techniques statistiques [66-69]: distribution Normale, distribution selon Weibull ...

II.5.1. Paramètres influençant la tension de claquage

II.5.1.1. Influence de l'humidité relative et des particules

L'eau constitue un danger potentiel pour les isolations. Elle peut intervenir soit à court terme (par son action directe ou indirecte), soit à long terme (en favorisant certains processus de dégradation). L'eau peut être présente dans l'huile sous forme dissoute ou en émulsion. La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la température, du type d'huile et de son degré de vieillissement. L'influence de l'eau sur la rigidité diélectrique de l'huile est très visible particulièrement pour des intervalles inter électrodes faibles (< 1 cm) dans un champ uniforme ou peu divergent. L'eau dissoute conduit à une diminution de la rigidité diélectrique.

Lorsque l'eau est sous forme d'émulsion (humidité importante), la diminution de la rigidité est plus importante. En présence d'humidité ou d'impuretés hygroscopiques comme par exemple les fibres de cellulose (Figure II.9), la rigidité diélectrique de l'huile diminue de manière très significative [70-72]. Dans ce cas, si l'intervalle inter électrodes est faible et le temps d'application de la tension long, le claquage de l'huile résultera de la formation d'un pont entre les électrodes. Avec l'augmentation de l'espace inter électrodes, l'influence de l'humidité et des autres impuretés diminue. Lorsque l'intervalle inter électrodes est de quelques dizaines de centimètres, cette influence devient négligeable. L'influence de l'humidité et des autres impuretés est aussi faible si le temps d'application de la tension est court (cas des tensions impulsionnelles), même si l'intervalle est faible.

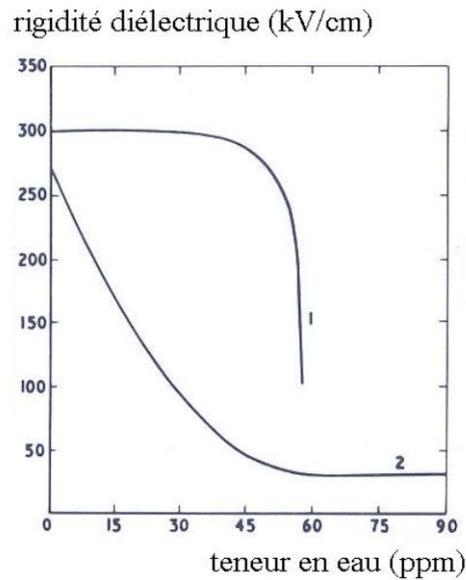


Figure II.9. Rigidité de l'huile minérale en fonction de la teneur en eau
 1) Sans cellulose 2) en présence de cellulose

La figure (II.10) [3] montre que la rigidité de l'huile n'est pas seule à diminuer quand la teneur en eau augmente, mais la tension de claquage aussi suit la même variation.

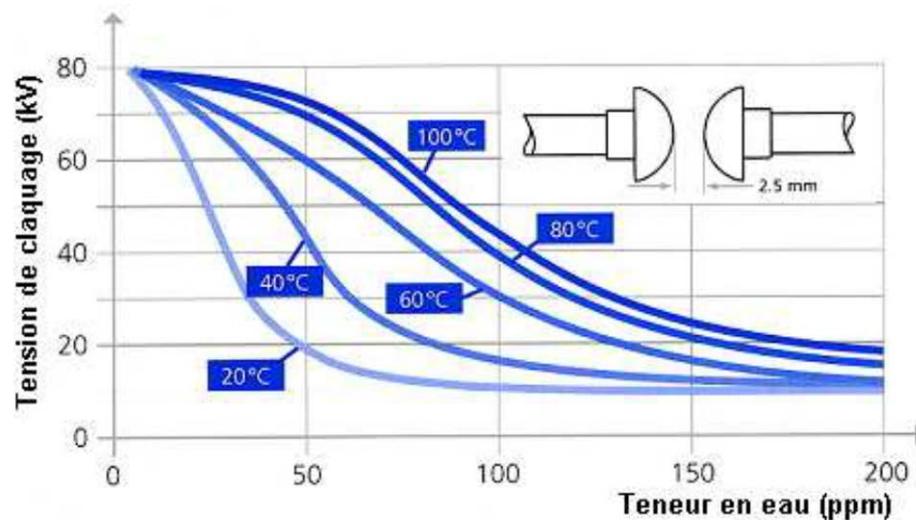


Figure II.10. Variation de la tension de claquage (50Hz) d'une même huile en fonction de la teneur en eau pour différentes températures [9]

II.5.1.2. Influence du temps d'application de la tension

La tension de claquage d'huile diminue avec l'augmentation du temps d'application de la tension (Figure II.11). Cette diminution est d'autant plus importante que la concentration des impuretés dans l'huile est grande. La diminution de la tension de claquage pour des temps >1 ms est liée à l'augmentation de l'influence des impuretés. Pour de tels temps, les particules impures se

mettent en mouvement pour aller prendre place sur l'axe des électrodes qui présente le champ électrique maximum et former des ponts.

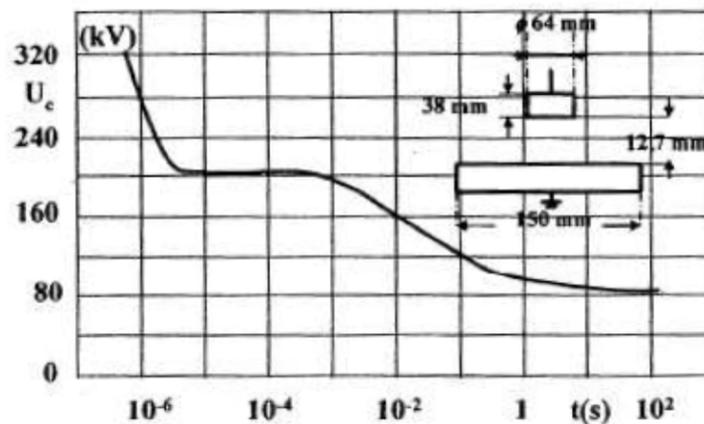


Figure II.11. Variation de la tension de claquage de l'huile de transformateur en fonction du temps d'application de la tension [3].

II.5.1.3. Influence de la géométrie des électrodes et de la polarité de tension

La tension de claquage d'une huile donnée augmente avec l'augmentation de l'intervalle inter électrode (contrairement à la rigidité) mais elle diminue avec l'augmentation du degré de non uniformité du champ. Pour un intervalle inter électrode donné, la tension de claquage augmente avec l'augmentation de la surface des électrodes. Cependant, contrairement à cela, la rigidité des huiles diminue lorsque la distance inter électrode augmente et aussi lorsque la surface des électrodes diminue (Figure II.12). Les études ont montré que la tension de claquage de l'huile dépend du volume de l'huile sous contrainte [72, 73].

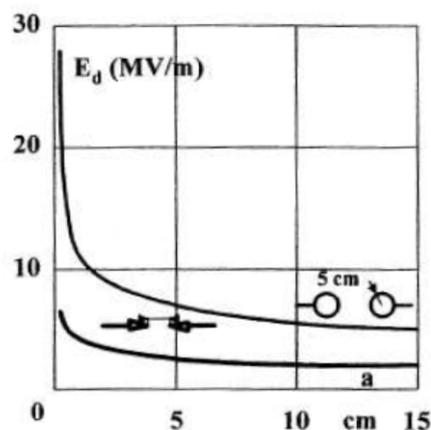


Figure II.12. Variation de la rigidité de l'huile transformateur en fonction de l'intervalle inter électrode pour un système pointe - pointe et un système sphère - sphère [3].

L'influence des dimensions sur la tension de claquage de l'huile est liée à l'existence d'impuretés dans l'espace inter électrode dont le nombre croît avec l'augmentation du volume d'huile. La tension de claquage en polarité négative est plus grande qu'en polarité positive pour un rayon de courbure d'électrode faible. Cette influence est liée à la différence dans le mécanisme d'évolution des streamers positifs et négatifs.

II.5.1.4. Influence de la pression et de la température

Il faut savoir qu'à teneur en eau constante la tension de claquage augmente avec la température [19] figure (II.13). Cet effet est directement lié à la solubilité de l'eau dans l'huile qui est une propriété croissante avec la température. Mais cet effet est interrompu à partir d'une teneur trop importante (200ppm). L'augmentation de la tension de claquage à température inférieure à 0°C est liée à la viscosité de l'huile et au mouvement des particules de glace et des impuretés qui devient plus difficile en présence d'un champ électrique.

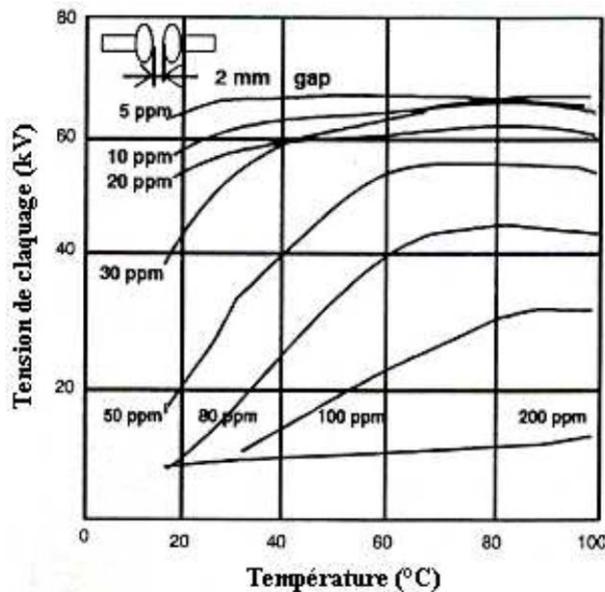


Figure II.13. Variation de la tension de claquage d'une huile minérale en fonction de la température pour différentes teneurs en eau [9]

La tension de claquage de l'huile augmente énormément avec l'augmentation de la pression. Cette dépendance montre l'implication des phénomènes gazeux dans le mécanisme de claquage. Nikuradse [74] a mis en évidence l'augmentation de la rigidité diélectrique avec un accroissement de la pression comme montré par la figure (II.14). Aussi, d'un autre côté, Beroual [75] a montré que l'accroissement de la pression limitait la propagation des streamers.

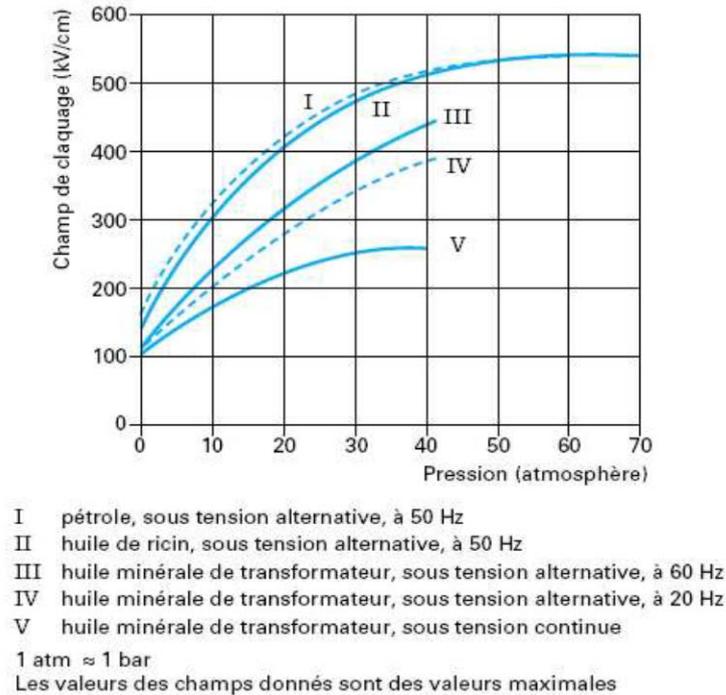


Figure II.14. Influence de la pression sur le champ de claquage [74]

II.5.1.5. Influence des barrières isolantes et du recouvrement d'électrodes

En champ divergent, la présence de barrières au voisinage immédiat de l'électrode acérée permet d'améliorer de façon significative la tension de claquage de la structure. De même, le recouvrement des électrodes par une couche isolante ou un dépôt isolant permet de relever la tension de claquage [76, 77].

II.5.1.6. Influence du vieillissement

Après vieillissement, la tension de claquage de l'huile diminue [6, 78, 79] ; les huiles esters naturels gardent généralement une bonne tension de claquage et deviennent pour certaines meilleures que les huiles minérales.

II.6. Modèles d'évaluation des vitesses de streamers

II.6.1. Modèle proposé par Devins, Rząd et Schwabe [30]

Les vitesses obtenues par ce modèle augmentent de manière quasi exponentielle avec le niveau de tension appliquée. De plus, elles sont très dépendantes de la distance intermoléculaire; une diminution de celle-ci de 6.3Å à 5Å augmente la vitesse de plus d'un ordre de grandeur.

Les potentiels d'ionisation (V_{io}) dans les liquides non polaires se situent entre 6eV et 10eV [80]. Une légère baisse de ce potentiel de 8 à 7eV, multiplie la vitesse par un facteur de l'ordre de 70. Par ailleurs, si on prend l'exemple de liquides largement étudiés comme le n-hexane

($V_{i0}=8.6\text{eV}$) et le n-pentane ($V_{i0}=9.15\text{eV}$) qui ont respectivement des vitesses moyennes pour les streamers filamenteux de 3.86 km/s et 4.23km/s [29], on obtient par ce modèle des vitesses dans le n-pentane 14 fois supérieures à celles du n-hexane.

Ce modèle, quoique donnant des variations proches de celles mesurées expérimentalement pour les vitesses de streamers supersoniques (basés sur les processus électroniques), ne tient pas compte des phénomènes lents donnant naissance à des streamers buissonneux. De la même manière que le modèle proposé par Felici [81], celui ci est basé sur la propagation d'un streamer sous forme d'un seul canal conducteur.

II.6.2. Modèles proposés par Watson et Watson et al.

Ce sont des modèles purement électrohydrodynamiques (EHD) basés sur le développement d'une cavité gazeuse préexistante ou créée par évaporation locale ou cavitation du liquide. Lors de son expansion, cette perturbation se développe en streamer. La vitesse de propagation est obtenue en combinant les équations des forces électrostatique et électrodynamique agissant à la surface du streamer.

1^{er} Modèle [82]

Watson considère une cavité gazeuse créée au sein du liquide en expansion entre les électrodes. La cavité est assimilée à une sphère conductrice au même potentiel que la cathode. Les temps de propagation obtenues par ce modèle sont très élevés par rapport à ceux mesurés expérimentalement. De plus, l'auteur ne fait pas de distinction entre les streamers positifs et négatifs qui présentent, dans la plupart des liquides, des formes et des vitesses différentes.

2^{ème} Modèle [83, 84]

Dans ce modèle, le streamer est assimilé à une cavité gazeuse générée au voisinage de l'électrode pointe et qui se développe dans le milieu isolant en moins d'une μs , avec une vitesse qui diminue dans le temps. Les forces mises en jeu dans la propagation dépendent principalement de la viscosité du liquide. La concordance des valeurs obtenues avec les mesures expérimentales n'est pas aussi bonne comme cela a été rapporté par ces auteurs [85].

II.6.3. Modèle proposé par N. Felici [81]

En assimilant le streamer à un canal cylindrique allongé, conducteur et contenant une phase gazeuse ionisée, Félici a tenté d'analyser la façon dont l'énergie électrique apportée au système était dépensée dans le milieu liquide. En effet, le travail des forces électriques est dépensé pour créer cette phase aux dépens du liquide, à l'ioniser, puis à repousser le liquide au fur et à mesure que le canal avance. La phase gazeuse est supposée constituée de vapeur du liquide.

Le canal est considéré électriquement neutre, relativement bon conducteur et ayant une certaine résistance électrique ' R_e '. Dans ce cas, en notant par (I) le courant pendant la progression et par (U) la tension appliquée, la condition nécessaire à la propagation est : $R_e \cdot I \ll U$.

Les vitesses déterminées par ce modèle ne sauraient dépasser le km/s. Cet ordre de grandeur des vitesses est plutôt caractéristique des streamers lents (de nature principalement gazeuse, comme le suppose l'auteur) dont la forme n'est pas filamentaire.

Le fait d'assimiler ce genre de streamers à un seul filament est en contradiction avec les observations expérimentales. Ils devraient être plutôt assimilés à une forme sphérique [83, 84] où à un ensemble de filaments [38, 86] prenant naissance à partir de l'électrode pointe.

II.6.4. Modèle proposé par A. Beroual [38, 86]

A. Beroual a proposé un modèle électro-énergétique tenant compte de toutes les formes d'énergie pouvant prendre part dans les phénomènes des streamers: Energie de vaporisation, de décomposition, énergie capillaire due à l'interface liquide - gaz, de déplacement et d'ionisation. Ce modèle est le seul à avoir établi une relation entre le courant, la charge, la vitesse et le mode de propagation des streamers. Il a été utilisé dans les liquides, l'air et les interfaces solide/liquide et solide/gaz isolants [87, 88].

En considérant un streamer constitué de (n) branches, l'énergie électrique est donnée par :

$$W_t = \sum_{j=1}^n q_j \cdot E_j \cdot dl_j$$

et l'énergie cinétique :

$$W_c = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} m_j \cdot v_j^2 = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (\rho \cdot \pi \cdot r_j^2 \cdot dl_j) \cdot v_j^2$$

où r_j , dl_j , v_j , q_j et E_j sont respectivement le rayon de la branche 'j', son déplacement, sa vitesse, sa charge et le champ électrique à sa tête vive. ρ est la masse volumique de la phase gazeuse. Si (β) est la fraction de l'énergie totale dédiée au déplacement du streamer, on aura :

$$W_c = \beta \cdot W_t$$

avec $0 \leq \beta \leq 1$

La vitesse correspondant à chaque déplacement dl_j du streamer, sera :

$$v_j^2 = \frac{2E_j}{\pi \cdot r_j^2 \cdot \left(\frac{\beta}{\rho}\right)^{-1}} \int i_j dt = \frac{2}{\pi \cdot r_j^2} \frac{\beta}{\rho} E_j \int i_j dt \quad (1)$$

Le champ à la tête de chaque branche correspondant à chaque charge élémentaire q_j est :

$$E_j = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{q_j}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_j^2} \quad (2)$$

où D est la densité de charge surfacique à la tête vive du streamer assimilée à une demi sphère de rayon r_j .

Par ailleurs, à partir des relations (1) et (2), on peut obtenir l'équation de la vitesse, sous la forme :

$$v_j = K_j \cdot q_j$$

$$\text{où } K_j = \left(\frac{\beta}{\varepsilon \cdot \rho}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2}\right) \quad \text{et } q_j = \int i_j \cdot dt$$

d'où l'expression de la vitesse instantanée d'une branche :

$$v_j = \left(\frac{\beta}{\varepsilon \cdot \rho}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2}\right) \cdot q_j \quad (3)$$

Pour estimer la vitesse moyenne du streamer dans le cas général, l'auteur tient compte du mode de propagation. Ceci dépend de la durée des impulsions de courant et du temps entre deux impulsions successives.

Soit $t_j = t_{pj} + t_{0j}$

et v_{pj} et v_{0j} , les vitesses durant t_{pj} et t_{0j} .

Où t_{pj} est le temps de propagation de la branche j et t_{0j} le temps de pause entre deux impulsions.

La longueur partielle de propagation du streamer l_j durant t_j sera :

$$l_j = v_{pj} \cdot t_{pj} + v_{0j} \cdot t_{0j}$$

Par ailleurs, $l_j = v_{aj} \cdot t_j$ où v_{aj} est la vitesse moyenne de l_j .

d'où :

$$v_{aj} = \left(\frac{t_{pj}}{t_j} \right) \cdot v_{pj} + \left(\frac{t_{0j}}{t_j} \right) \cdot v_{0j}$$

Il apparaît que la vitesse augmente lorsque t_{0j} décroît.

$$\text{Si } \left(\frac{t_{0j}}{t_j} \right) \rightarrow 0, \text{ alors } v_{aj} \rightarrow v_{pj}$$

$$\text{et } I_s = \sum_{j=1}^n I_j = v_{as} \cdot \left(\sum_{j=1}^n t_j \right)$$

où v_{as} est la vitesse moyenne, I_s étant généralement une fonction discontinue.

$$\text{d'où : } v_{as} = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^n t_j \right)} \sum_{j=1}^n (v_{pj} t_{pj} + v_{0j} t_{0j})$$

$$\text{où } v_{pj} = K_j \cdot q_{pj} \quad \text{et} \quad q_{pj} = \int i_{pj} dt$$

$$v_{0j} = K_j \cdot q_{0j} \quad \text{et} \quad q_{0j} = \int i_{0j} dt$$

i_{0j} est le courant entre deux impulsions successives (i.e. courant de conduction) et i_{pj} le courant de l'impulsion j .

En pratique $v_{0j} \approx 0$

$$\text{et } v_{as} = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^n t_j \right)} \sum_{j=1}^n v_{pj} t_{pj}$$

Ainsi,

$$v_{as} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n t_j} \sum_{j=1}^n K_j q_{pj} t_{pj} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n t_{pj}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) q_{pj} \cdot t_{pj}$$

En supposant que t_p est le même pour chaque branche, on obtient :

$$v_{as} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \sum_{j=1}^n q_{pj} \quad (4)$$

De cette expression, il apparaît que le streamer est d'autant plus rapide que :

- le nombre de branches décroît ;
- et/ou le rayon de ces branches décroît ;
- et/ou sa charge augmente ;
- et/ou l'énergie nécessaire à son déplacement est importante.

La figure II.14 donne les variations de la vitesse pour différentes charges globales et différents nombres de branches. Le rayon r_j de ces branches est considéré constant; il est de l'ordre de 5 à 50 μm pour les streamers rapides, d'après les différentes observations expérimentales [29, 89-91].

En prenant $\epsilon_r = 2$, $\beta = 10\%$ et une densité $\rho = 500\text{kg/m}^3$ nous avons obtenu (figure II.14) [85] des variations concordantes avec les observations expérimentales. Ces vitesses sont relativement importantes ; elles correspondent à la propagation d'un streamer positif.

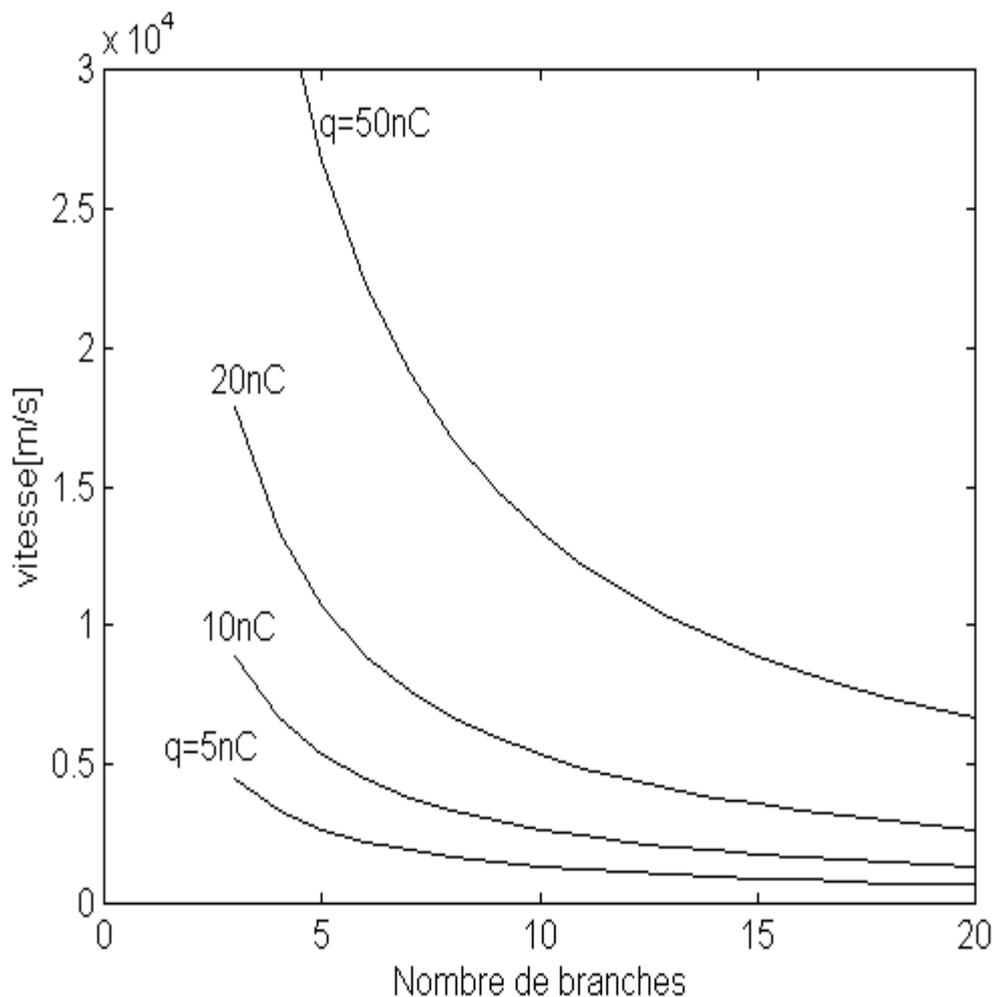


Figure II.14. Variations de la vitesse de propagation en fonction du nombre de branches pour différentes charges, selon le modèle de Beroual. $\epsilon_r=2$, $\rho=500\text{kg/m}^3$, $\beta=10\%$, $r_j=20\mu\text{m}$.

Si on considère que les différentes branches du streamer prennent naissance à partir de la pointe et se propagent simultanément vers le plan (ceci est surtout valable pour les streamers lents en buisson), la longueur du streamer pourra être correctement approximée sous la forme :

$$l_s = \frac{\sum_{j=1}^n l_j}{n}$$

n , étant le nombre de branches.

Et la vitesse v_{as} devient

$$v_{as} = \frac{1}{n \cdot \sum_{j=1}^n t_{pj}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \cdot q_{pj} \cdot t_{pj}.$$

Et en supposant que t_p est le même pour chaque saut, cette expression devient :

$$v_{as} = \frac{1}{n^2} \cdot \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \sum_1^n q_{pj} \quad (5)$$

Cette relation donne des valeurs de vitesses allant de quelques dizaines de mètres par seconde si le nombre de branches est important à des vitesses pouvant dépasser le km /s pour un nombre de branches inférieur à 5 (figure II.15). Ces valeurs sont obtenues pour une densité de 100 kg/m³, ce qui correspond à une phase gazeuse caractérisant les streamers négatifs lents.

On peut par ailleurs exprimer v_{as} en fonction de E_{pj} sous la forme :

$$v_{as} = \frac{1}{n \cdot \sum_{j=1}^n t_{pj}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} (2 \cdot \epsilon) \cdot E_{pj} \cdot t_{pj}.$$

La figure II.16 donne les variations de la vitesse v_{as} en fonction du champ électrique à la pointe du streamer, en comparaison des variations obtenues d'après le modèle de Devins et al. [30].

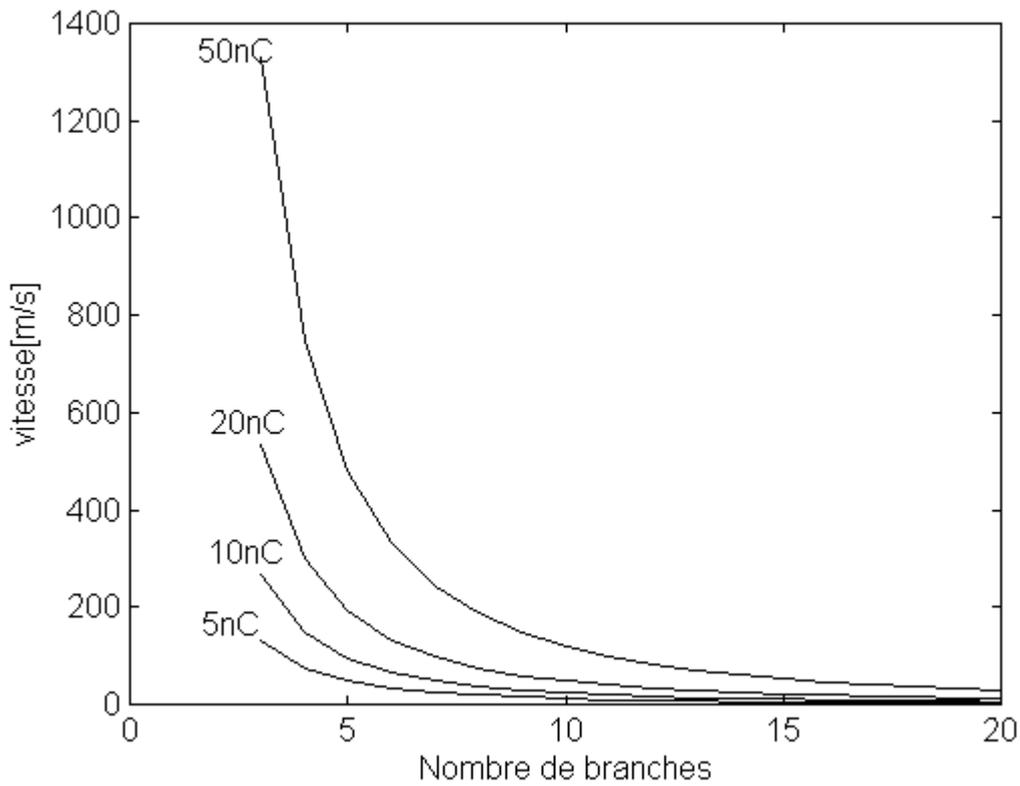


Figure II.15. Variations de la vitesse de propagation en fonction du nombre de branches pour différentes charges, selon le modèle de Beroual. $\epsilon_r=2$, $\rho=100\text{kg/m}^3$, $\beta=10\%$, $r_j=100\mu\text{m}$ [85].

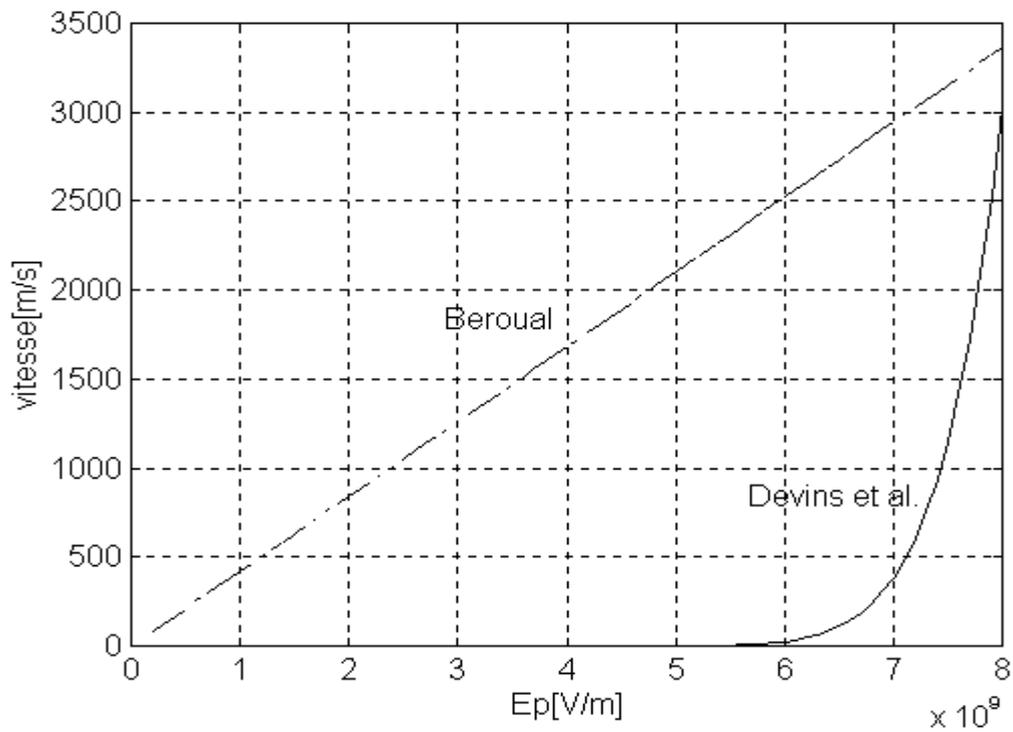


Figure II.16. Variations de la vitesse des streamers en fonction du champ appliqué, selon les modèles de Beroual et Devins *et al.*[85]

II.7. Modèle électrique de propagation de Fofana et Bérroual [87]

Si on considère un système d'électrodes pointe-plan soumis à une différence de potentiel U . Lorsque cette dernière dépasse une certaine valeur, un streamer s'initie et se développe entre l'électrode acérée et le plan. Cette propagation peut avoir lieu soit par sauts ou de façon continue tel que montré dans des travaux antérieurs [38, 92]. Ceci dépend de l'énergie injectée dans l'intervalle inter-électrodes, de la géométrie du système, de la nature du liquide et de la forme de la tension appliquée. Le streamer peut revêtir une forme en buisson ou filamentaire.

Fofana et Beroual ont considéré que le streamer est constitué de N_b branches. Chaque branche est assimilée à un canal cylindrique de rayon r et de conductivité σ [81], et est représentée par une cellule RC (R et C étant respectivement une résistance et une capacité). Le streamer peut être représenté par un circuit électrique équivalent [50] (figure II.17), où R_0 et C_0 sont la résistance et la capacité du système sans présence de streamer. La résistance R_0 de l'électrode de terre est estimée à 100Ω . La capacité C_0 a été mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance numérique (HP.4194A) à des fréquences allant jusqu'à 100MHz . Elle est de l'ordre de 1pF pour une distance de 20mm et de l'ordre de 2pF pour une distance inter-électrodes de 1mm . Le rayon de courbure de l'électrode pointe est de $10\mu\text{m}$ et l'électrode plane de terre (profilée selon Rogowski) a un diamètre de 39mm et une épaisseur de 9mm .

La propagation du streamer correspond à la fermeture des interrupteurs S_i à travers une cellule élémentaire (fig. II.18) engendrant ainsi un courant $I_i(t)$ donné par les relations suivantes :

$$I_i(t) = \frac{V_{i-1}(t) - V_i(t)}{R_i(x)} \quad (6)$$

et

$$I_i(t) = C_i(x) \cdot \frac{dV_i(t)}{dt} \quad (7)$$

où x est la longueur axiale du streamer. Par ailleurs, nous avons,

$$C_{i-1}(x) \cdot \frac{dV_{i-1}(t)}{dt} = I_{i-1}(t) - I_i(t) \quad (8)$$

En dérivant l'équation (6), on obtient

$$\frac{dI_{i(t)}}{dt} = \frac{1}{R_i^2(x)} \cdot \left[\left(\frac{dV_{i-1}(t)}{dt} - \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \cdot R_i(x) - (V_{i-1}(t) - V_i(t)) \cdot \frac{dR_i(x)}{dt} \right] \quad (9)$$

Et en substituant les équations (6), (7) et (8) dans (9), on obtient :

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{1}{R_i(x)} \left[\frac{I_{i-1}(t)}{C_{i-1}(x)} - I_i(t) \left(\frac{1}{C_i(x)} + \frac{1}{C_{i-1}(x)} \right) - I_i(t) \cdot \frac{dR_i(x)}{dt} \right] \quad (10)$$

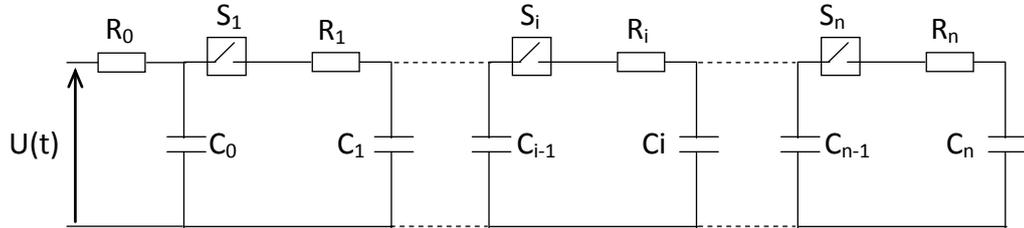


Figure II.17. Modèle de circuit électrique représentant l'évolution du streamer [87].

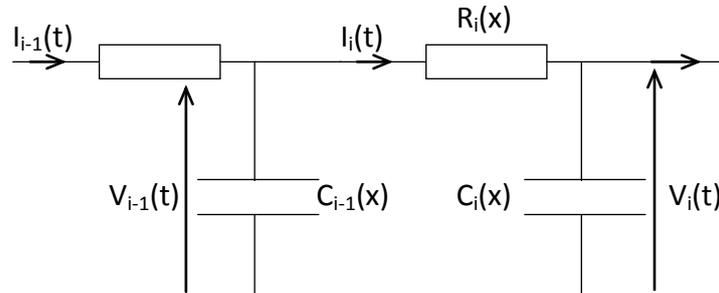


Figure II.18. Cellule élémentaire [87].

Les valeurs et la forme de variation des éléments du circuit électrique équivalent précédent dépendent de la polarité de la tension et de la forme du streamer.

- **Résistance :**

En supposant que chacune des branches successives d'un streamer filamenteux constitue un canal cylindrique, sa résistance peut être donnée par l'expression suivante

$$R_i = \frac{dx_i}{\sigma \pi r_i^2}$$

Où R_i : résistance de la branche d'ordre i

dx_i : longueur de la branche d'ordre i

σ : la conductivité du streamer

r_i : le rayon du cylindre

σ et r_i sont supposées constantes durant toute la propagation du streamer

Dans le cas d'un streamer en buisson (constitué d'un grand nombre de branches qui se ramifient) l'expression de la résistance élémentaire reste la même que la précédente. Cependant la valeur de la conductivité (σ) sera différente en raison du grand nombre de branches.

- **Capacité des condensateurs :**

La capacité (C_i) du condensateur équivalent au système constitué par le streamer (de longueur x) et le plan de masse dépend elle aussi de la forme du streamer et du nombre de ses branches. Nous pouvons considérer par exemple deux cas :

Streamer filamentaire :

Dans ce cas le streamer est supposé constituer un canal cylindrique de rayon (r) et de longueur (x_i) figure (II.19). La capacité est donnée par [87].

$$C_i = 2 \pi \varepsilon \alpha_i [1 + (r / (D - x_i))]$$

Avec $\alpha_i = 1 - \cos(\theta_i)$

Ou θ_i : est l'angle entre la tête du streamer et l'extrémité du plan de masse

D : est la distance inter électrode

X_i : est la longueur du streamer à l'étape (i)

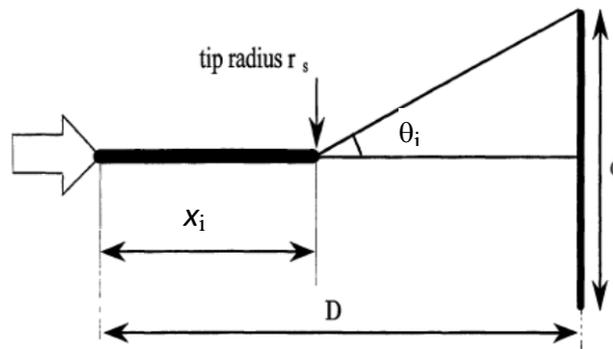


Figure II.19. Model cylindrique du streamer filamentaire [87]

Streamer en buisson :

Dans ce cas le streamer est considéré comme étant un hémisphère de rayon (R_i) qui progresse partant de l'électrode pointe vers le plan de masse. La capacité du condensateur équivalent est alors donnée par l'expression suivante.

$$C_i = 2 \pi \varepsilon f [D R_i / (D-R_i)]$$

Où f est un facteur correcteur introduit pour prendre en compte que le streamer n'est pas une sphère complète et son angle solide est plus petit que 4π .

Selon le cas, les expressions des composants sont remplacées dans les équations qui régissent le modèle et dont la résolution, afin de déduire les valeurs du courant à chaque instant, se fait numériquement étape après étape durant la propagation du streamer.

II.8. Conclusion

Il ressort de cette analyse bibliographique, que les mécanismes de pré-claquage et de claquage dans les diélectriques liquides sont complexes. Ils dépendent de plusieurs paramètres : la géométrie des électrodes (forme, intervalle inter électrodes et rayon de courbure), la tension appliquée (forme, polarité, amplitude), structure du liquide (présence ou non d'halogènes dans la structure moléculaire), présence ou non d'additifs spécifiques, la pression et la température. À ces paramètres, il faut ajouter les paramètres extérieurs comme l'humidité et la présence d'impuretés (particules déformables (bulles de gaz, eau en suspension) ou non déformables (solides), conductrices ou non conductrice). Dans ce chapitre nous avons essayé de montrer l'effet de chaque paramètre (d'après des travaux antérieurs) aussi bien sur la valeur de la tension de claquage que sur la forme et la propagation des streamers.

Plusieurs modèles, soit physiques (énergétiques en particulier) pour le calcul des vitesses des streamers, ou électriques pour le calcul des courants et d'autres caractéristiques électriques de ces derniers, ont été exposés.

Le modèle de Devins, Rzed et Schwabe aboutit à des vitesses généralement élevées et qui augmentent exponentiellement en fonction de la tension appliquée et qui sont en plus très rapidement variables lorsque la distance intermoléculaire subit de petits changements. Alors que les modèles de Watson et al, qui sont basés sur le calcul des énergies électrohydrodynamiques, donnent des résultats incompatibles avec les mesures pratiques ; en plus le premier modèle ne distingue pas entre les streamers positifs et négatifs. Quand au modèle de N. Felici, ce dernier considère une forme monocanal du streamer alors qu'il aboutit à des résultats compatibles avec les mesures faites sur des streamers en buisson ce qui constitue une contradiction.

Le modèle énergétique de Beroual considère que chaque streamer est formé de (n) branches et que la durée de chaque saut de chacune d'elles est égale à la somme d'un temps de propagation (t_p) correspondant au temps d'une impulsion et un temps de pause (t_0) (entre deux impulsions

successives de courant), et il suppose que la vitesse de propagation pendant ce dernier est nulle. Il est clair que ces suppositions ne peuvent s'appliquer qu'aux streamers lents (pour lesquels les impulsions de courant sont toutes suivies de retour à zéro) alors que les streamers rapides et très puissants (comme nous le verrons plus loin) ne sont pas caractérisés par des temps d'absence de courant et par conséquent leur vitesse de propagation ne s'annule à aucun instant. Il en découle que ce modèle ne soit peut-être pas adapté à ce type de pré-claquage. De plus l'auteur définit la vitesse moyenne de propagation d'un streamer par le rapport de la somme des longueurs élémentaires par la somme des temps élémentaires ; ce qui est très difficile à admettre. Beroual a aussi élaboré un modèle électrique, constitué de cellules (RC) en cascade pour représenter la propagation des streamers. Ce modèle sera discuté plus en détail dans le dernier chapitre.

Chapitre III

Technique expérimentale et Analyse énergétique

III.1. Introduction

Les phénomènes de pré-claquage qui dépendent d'un grand nombre de paramètres, précédemment cités, possèdent une multitude de caractéristiques qui les différencient les uns des autres et qui servent à l'étude et au diagnostic de ces dernières. Parmi ces caractéristiques nous pouvons citer :

- La forme du streamer (buisson, pagode, filamentaire...)
- La vitesse du streamer.
- La longueur finale du streamer.
- L'émission lumineuse qui accompagne le streamer.
- L'émission sonore (acoustique) et onde de pression.
- L'émission thermique.
- Le courant qui traverse les électrodes.
- La quantité de charge impliquée.
- L'énergie électrique injectée par la source.

L'étude approfondie des streamers doit passer par la mesure et l'enregistrement éventuel de toutes ces caractéristiques à la mesure du possible. Cette étude peut soit concerner une caractéristique particulière ou alors se pencher sur plusieurs d'entre elles tout en recherchant une relation ou interdépendance qui les relierait [95-130]. L'élaboration d'un diagnostic qui tiendrait compte de toutes les caractéristiques précédentes en même temps serait peut être impossible.

Dans le présent travail, nous nous intéressons particulièrement aux courbes de courant et celles des émissions lumineuses enregistrées lors de la génération et de la propagation des streamers.

Ces courbes qui possèdent un très grand intérêt dans la classification des streamers et la connaissance des phénomènes physicochimiques intervenant à l'intérieur du liquide (et de la phase gazeuse) lors du pré-claquage sont enregistrées grâce au système de mesure décrit en détails dans [85]. Nous reprenons les éléments essentiels dans ce qui suit.

III.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 1.a) est constitué d'une source de tension, d'une cellule d'essai et de systèmes de mesure et d'enregistrement des courants, des charges et des émissions lumineuses.

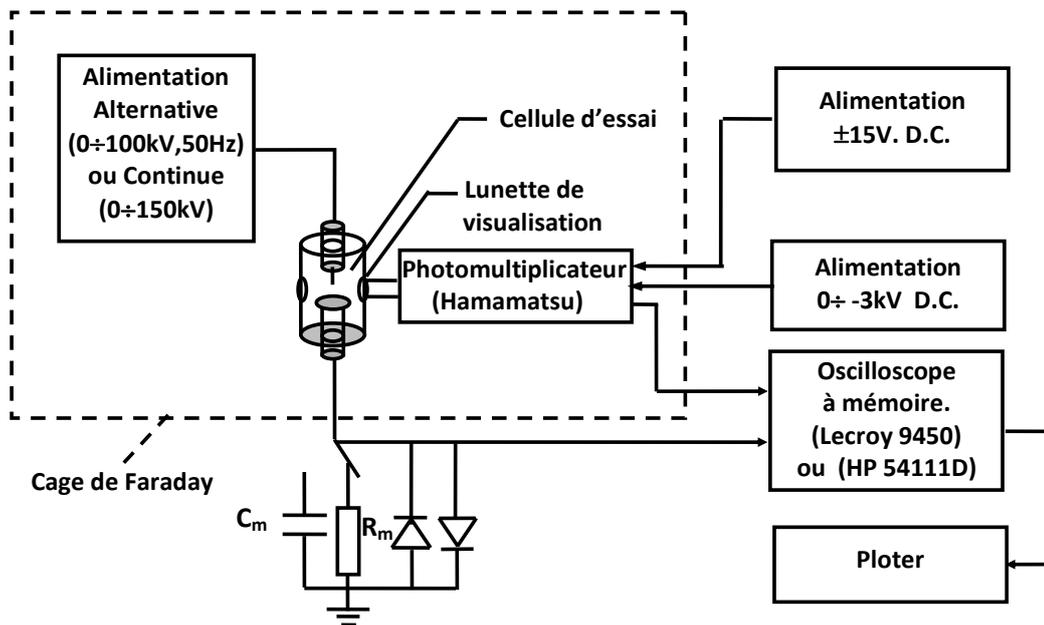


Figure III.1.a. Dispositif Expérimental

III.2.1. Sources de tensions

Deux types de tensions ont été utilisés pour la réalisation des mesures: une tension continue et une tension alternative 50Hz. Une autre étude réservée exclusivement à la tension de choc de foudre a été menée antérieurement [94]. Dans le présent travail nous nous sommes intéressés uniquement aux enregistrements effectués sous tension continue.

La source de tension alternative est constituée d'un transformateur élévateur (220V/50kV, 50Hz). La source de tension continue est un générateur fournissant une tension variable entre 0 et 150 kV. Lors de nos essais, la tension est augmentée ou réduite par paliers d'environ 2kV/s.

La plage de tension d'étude s'étale entre un seuil que nous supposons minimal de génération où, au plus 2 streamers sont générés pendant une heure d'application de la tension, et un seuil maximal au dessus duquel au moins 50% des streamers enregistrés mènent à un claquage.

III.2.2. Liquides testés

Les essais ont porté principalement sur trois liquides: l'huile minérale de transformateur, le tétraester de qualité industrielle et le toluène de qualité spectroscopique. Mais notre choix a porté sur les courbes obtenues pour l'huile minérale vu son faible cout et en plus c'est l'huile la plus utilisée dans les transformateurs de puissance.

III.2.3. Cellule d'essai

La cellule d'essai est constituée d'un corps cylindrique en Pyrex de capacité volumique 0.5l. Elle est destinée à des essais sous pression atmosphérique. Elle comporte un seul "hublot" de 10mm de diamètre pour la visualisation, une électrode plane en laiton de 40mm de diamètre bloquée par une barrière en Plexiglas de 1,2mm d'épaisseur et une électrode pointe en laiton, de rayon de courbure 10 μ m. L'intervalle inter-électrodes peut être varié entre 1 et 20mm.

Afin d'éviter les déclenchements intempestifs de l'oscilloscope dus aux courants de fuite à travers les parois extérieures de la cellule, des ailettes en résine isolante ont été placées afin d'allonger la ligne de fuite et permettre ainsi d'élever le niveau de tension appliqué.

Le liquide est renouvelé systématiquement et le rayon de la pointe est également contrôlé après chaque claquage.

Les électrodes pointes sont obtenues de deux manières:

- Par corrosion électrochimique: ce procédé permet d'obtenir des pointes de rayon inférieur à 1 μ m [85].
- Par usure mécanique à l'aide d'un papier verre très fin appliqué à la pointe fixée sur un tour à faible vitesse de rotation. Cette méthode ne permet pas de réaliser des rayons inférieurs à 1 μ m; elle présente néanmoins l'avantage d'obtenir des pointes avec une parfaite conicité, ce qui n'est pas le cas pour la précédente méthode.

Les pointes utilisées dans nos essais sont en laiton de rayon de courbure 10 μ m, sauf pour les essais de claquage où elles sont en tungstène.

III.3. Mesure des courants

Le courant de streamer est mesuré à travers une résistance R_m de 50 Ω , non inductive, placée entre l'électrode plane et la terre, et connectée à l'entrée 50 Ω d'un oscilloscope numérique à mémoire (Lecroy 9450, bande passante 350M.Hz). L'entrée de l'oscilloscope est protégée à l'aide de deux diodes rapides (AN4148, 100mA, 4ns, 100V) montées en tête bêche.

Le courant peut également être mesuré directement sur la borne haute tension à l'aide d'un système à photodiodes et fibre optique.

Le niveau d'enclenchement de l'oscilloscope "trigger" est choisi le plus bas possible afin d'enregistrer la moindre manifestation de streamer tout en évitant les enclenchements intempestifs de l'oscilloscope, dus aux courants de décharges partielles à travers les parois externes de la cellule d'essai. Ce niveau est d'autant plus élevé que la distance inter-électrodes et la tension appliquée sont élevés.

Dans la plupart des cas, l'oscilloscope est utilisé en mode 'séquences' enregistrant simultanément les 20, 50 ou 100 premiers événements. Ce nombre est dans la plupart des cas, fixé à vingt, d'une part, par le fait que tous les types de courant susceptibles de se manifester à un niveau de tension donné, sont enregistrés. D'autre part, en prenant un nombre supérieur, les signaux acquis peuvent être tronqués en partie et perdre en résolution.

III.4. Détection de la lumière émise

La lumière émise par le streamer a été détectée à l'aide d'un photomultiplicateur (Hamamatsu) muni d'une grille de photodiodes très sensibles, polarisée par un générateur continu $\pm 15V$; le signal électrique ainsi obtenu est amplifié à l'aide d'un générateur haute tension continue négative variable ($0 \div -3kV$). L'amplification maximale du signal est obtenue aux alentours de 1,8 kV lorsque la grille de photodiodes est placée à environ 10 cm de la source émettrice de lumière (le streamer). Au delà de cette tension, il y a saturation de l'appareil.

Dans le souci de capter en totalité la lumière émise, la cellule d'essai a été enduite de l'extérieur par une laque blanche et une fenêtre de mêmes dimensions que la grille de photodiodes ($42 \times 4,5 \text{mm}^2$) a été laissée. Ces deux dernières sont rapprochées le plus possible l'une de l'autre afin d'obtenir un maximum de sensibilité lumineuse de l'appareillage utilisé.

III.5. techniques d'analyse

L'intérêt des courbes de courant dans l'étude des décharges partielles n'est pas à démontrer, mais il faut quand même signaler la difficulté de l'enregistrement de ces courants dans les installations de hautes tensions en fonctionnement. Il est par conséquent souhaitable, si on veut prévoir ou étudier les pré-claquages dans ces installations, d'utiliser d'autres caractéristiques, telles que les émissions sonores ou lumineuses qui peuvent probablement être enregistrés plus facilement. Mais pour cela il est d'abord nécessaire d'établir une relation entre la caractéristique désirée et le courant associés au même événement pour savoir si les deux informations dévoilées sont semblables ou différentes. Un exemple des résultats obtenus lors des différents enregistrements sous les deux polarités est montré par les figures (III.1) et (III.2) suivantes. Celles-ci montrent clairement la complexité des courbes et donc la difficulté de leur analyse.

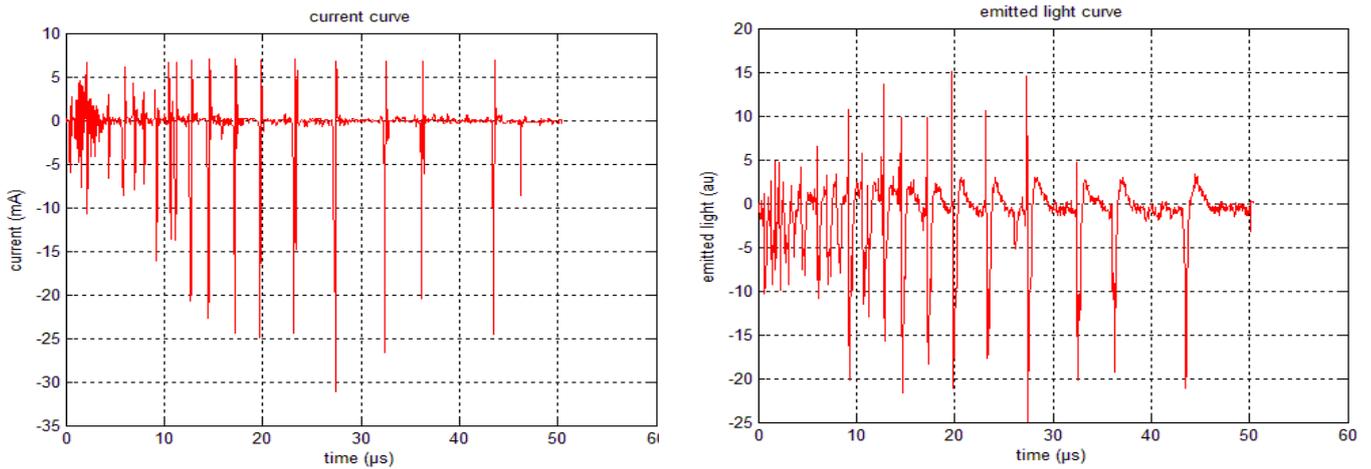


Figure III.1. Courbe de courant et courbe d'émission lumineuse correspondant à un streamer en polarité négative

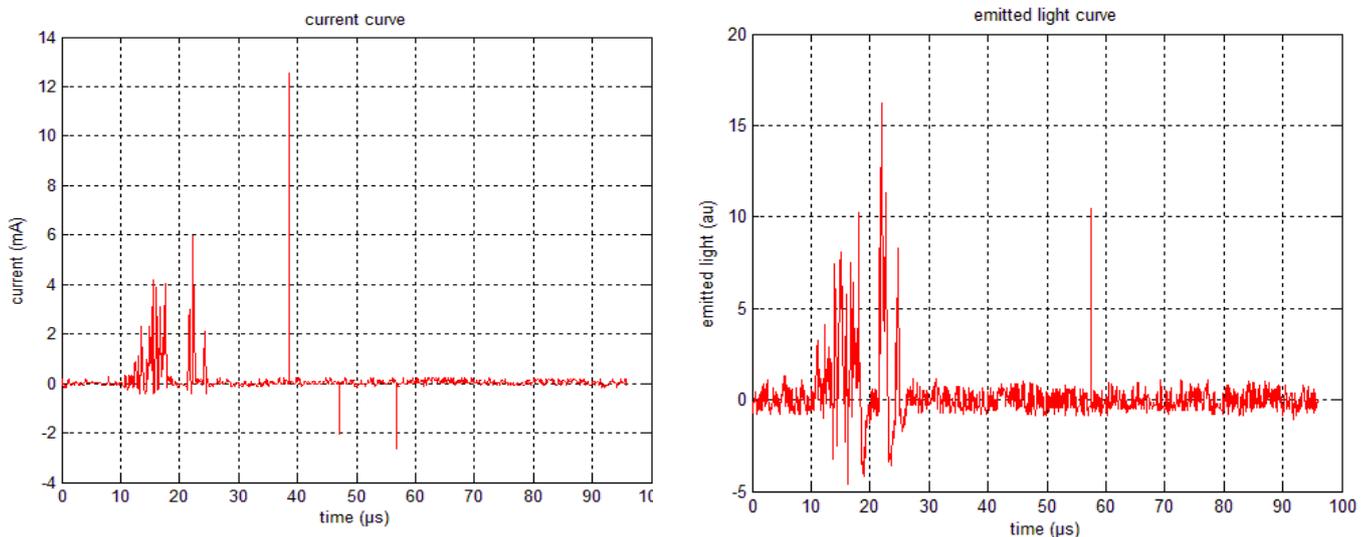


Figure III.2. Courbe de courant et courbe d'émission lumineuse correspondant à un streamer en polarité positive

L'exploitation de ces courbes passe par des techniques qui dépendent de l'information recherchée. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à un certain nombre d'informations à savoir :

III.5.1. La contenance spectrale (analyse fréquentielle)

Dans le but de rechercher l'éventuelle existence de fréquences particulières, les signaux numérisés de courant et d'émission lumineuse doivent subir une analyse fréquentielle, ceci peut être fait en utilisant plusieurs techniques (transformée de fourrier, transformée en ondelette ...). Dans ce travail nous avons appliqué aux différents signaux une T.F.R (transformée de fourrier

rapide), FFT (fast fourrier transform). Cette transformée, qui constitue un outil longuement utilise en traitement du signal, est calculée en utilisant l'expression suivante.

$$F(k) = \sum_{t=0}^{T-1} x(t) \exp(-2\pi j.k/T)$$

- x : signal à étudier.
- F : Transformée de fourrier.
- T : longueur du vecteur x .

La FFT Permet en effet de connaitre toutes les fréquences contenues dans un signal et leurs amplitudes, mais malheureusement, elle ne donne aucune information sur la distribution temporelles de ces fréquences, c'est-à-dire qu'elle ne nous informe pas sur l'intervalle de temps pendant lequel apparaissent les différentes fréquences.

III.5.2. Auto et inter corrélation

Comme cité en introduction, l'un des principaux objectifs de ce travail est l'étude de l'inter corrélation entre le courant et la lumière émise correspondant au même événement.

La notion de corrélation se rapporte à une comparaison d'un signal donné avec lui-même. La fonction d'auto corrélation est habituellement calculée pour un signal aléatoire dans le but de détecter d'éventuelles redondances entre ses différentes parties, ce qui permettrait de prédire, d'avance, approximativement les valeurs futures de ce signal.

L'expression mathématique qui donne la fonction d'auto corrélation d'un signal $x(t)$ est donnée par :

$$\text{cor}x(\zeta) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t - \zeta)dt$$

Ou ζ représente un temps de décalage.

Pour les signaux numérisés, cette expression devient

$$\text{cor}x(\zeta) = \sum_{t=0}^{T-1} x(t)x(t - \zeta)$$

Cette fonction est paire [$\text{cor}x(\zeta) = \text{cor}x(-\zeta)$], et atteint un maximum pour ($\zeta = 0$). Ce maximum représente l'énergie du signal.

Généralement, la fonction d'auto corrélation n'est pas considérée par ses valeurs réelles, mais elle est normalisée justement par rapport à l'énergie du signal, ce qui réduit à « 1 » sa valeur maximale.

Dans ce même ordre d'idée, l'inter corrélation se rapporte quand à elle, à la ressemblance pouvant exister entre deux signaux différents.

Mathématiquement, la fonction d'inter corrélation entre deux signaux $x(t)$ et $y(t)$, est donnée par l'expression suivante

$$\text{Cor } x \ y(\zeta) = \sum_{t=0}^{T-1} x(t) y(t - \zeta)$$

La forme de la courbe d'inter corrélation entre les deux signaux x et y dépend fortement de la forme de variation de chacun des deux.

Les valeurs de la fonction d'inter corrélation prise dans un repère absolu ne peuvent servir à conclure concernant la ressemblance entre les signaux, mais c'est plutôt à partir de l'observation de la forme de la courbe, qui représente cette fonction, toute entière. Ceci permet de juger du degré de ressemblance des deux signaux, à travers la détection d'extremums sur cette courbe et de la variance entre ces points maximum et les autres valeurs de la fonction. Une comparaison entre la fonction d'inter corrélation des signaux x et y et la fonction d'auto corrélation de l'un des deux peut être assez informative. (Les deux signaux seront parfaitement identiques lorsque leurs fonctions d'inter-corrélation et d'auto-corrélation sont identiques).

III.5.3. L'énergie et la puissance électrique

Nous n'avons pas besoin de démontrer que la génération et la propagation des steamers et tous les phénomènes physicochimiques qui l'accompagnent puisent leur énergie à partir de la source de tension (qui fournit donc le courant). Ceci montre l'importance de la connaissance de l'énergie électrique fournie par la source durant chaque évènement.

Le calcul mathématique de l'énergie électrique utilise les valeurs instantanées du courant enregistrées pendant chaque pré-claquage et se fait en appliquant la formule suivante :

$$E = U \cdot \int_0^{t_f} I(t) dt$$

Où

- E : l'énergie électrique.
- U : tension appliquée
- I : le courant enregistré
- T_f : la durée finale du streamer.

Cette expression devient pour les signaux numérisés :

$$E = U \sum_{t=0}^{T-1} I(t) \Delta t$$

Où Δt : représente la période d'échantillonnage

Une fois la valeur de l'énergie connue, il est facile d'en déduire la valeur de la puissance électrique moyenne $p(m)$ en utilisant l'expression suivante :

$$P_m = E / T_f$$

Il sera montré dans le chapitre suivant que cette puissance, qui représente la vitesse de transfert de l'énergie, formera un nouveau critère très adapté pour la reconnaissance des streamers et leur classification.

III.6. Analyse des énergies et puissances

Il est facile de remarquer, dès la première vue des courbes de courant et celles d'émission lumineuse des figure (III.1) et figure (III.2) que les signaux à traiter sont très aléatoires et très rapidement variables. Pire encore, ils sont non stationnaires (c.à.d. possédant des caractéristiques statistiques variables dans le temps). Ceci ne découle pas d'un hasard mais plutôt du fait que les phénomènes de pré-claquage sont complètement stochastiques. D'ailleurs, l'un des grands problèmes qui entravent les études de ces phénomènes, est celui de la reproductibilité...c.à.d. qu'il est quasiment impossible de reproduire les mêmes courbes en refaisant la même expérience sous les mêmes conditions. Car si les conditions externes d'expérimentation sont commandables, les conditions internes (c.à.d. concernant la structure interne des huiles diélectriques (liquide, gaz, humidité, impuretés...) ne le sont pas du tout. Ceci a fait que sous les mêmes conditions, les mêmes mesures faites deux fois de suite donnent des courbes différentes aussi bien pour le courant que pour la lumière.

III.6.1. Classification énergétiques

Les courbes de courants et celles des émissions lumineuses enregistrées durant les différentes décharges partielles ont été obtenues pour plusieurs niveaux de tension pour les deux polarités positive et négative et pour différentes distances inter électrode. Pour tous les enregistrements, les lumières émises par les streamers sont captées dans le domaine du visible, c.à.d. correspondant aux longueurs d'ondes comprises entre 380 et 780 nm [85]. Les calculs de l'énergie mise en jeu pendant chaque événement, ainsi que de la puissance moyenne

correspondante, ont permis de classer les streamers du point de vue énergétique en trois classes distinctes, comme montré par les figures (III.3) et (III.4).

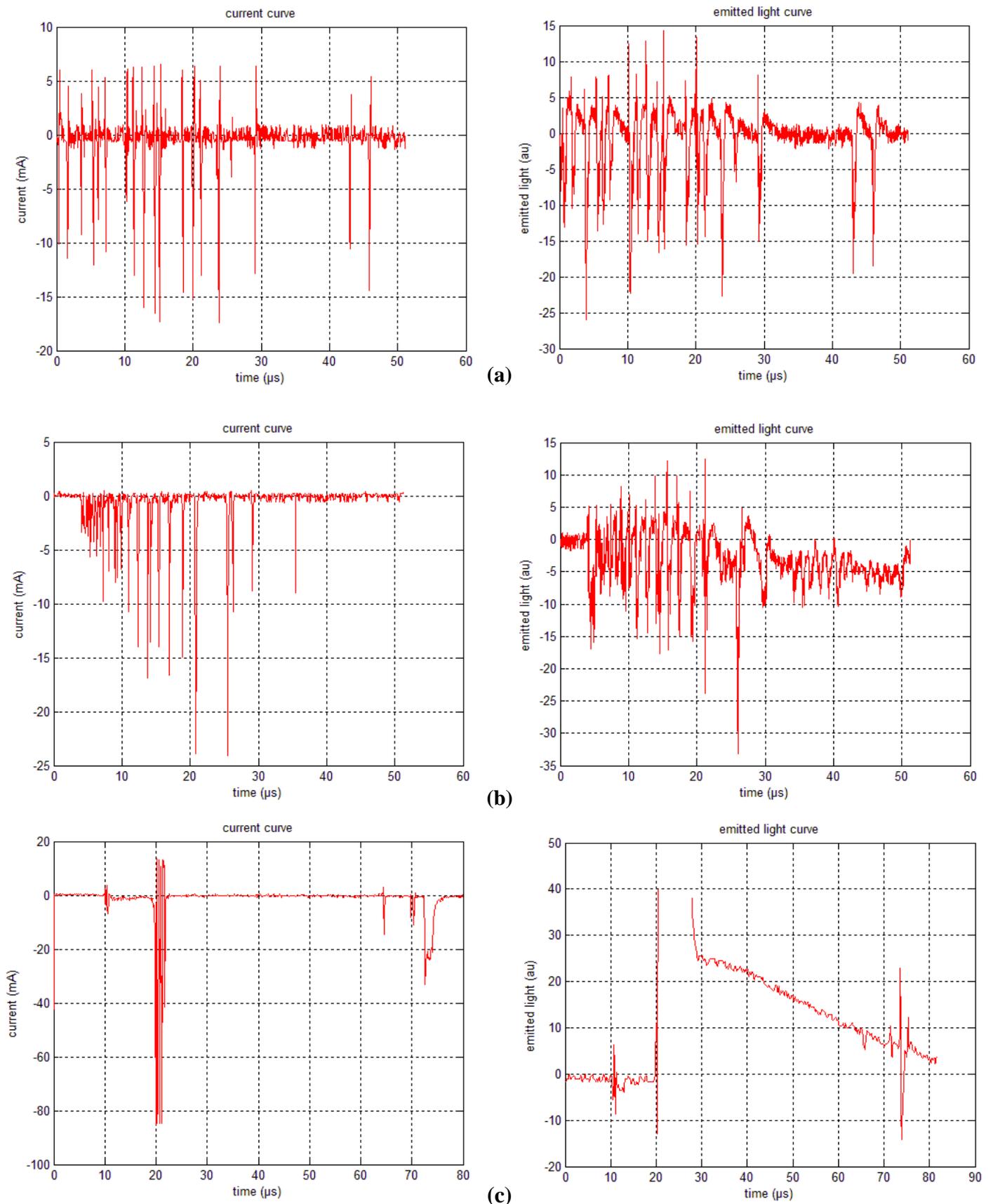


Figure III.3. Différents types de courants et d'émissions Lumineuses enregistrés en polarité négative

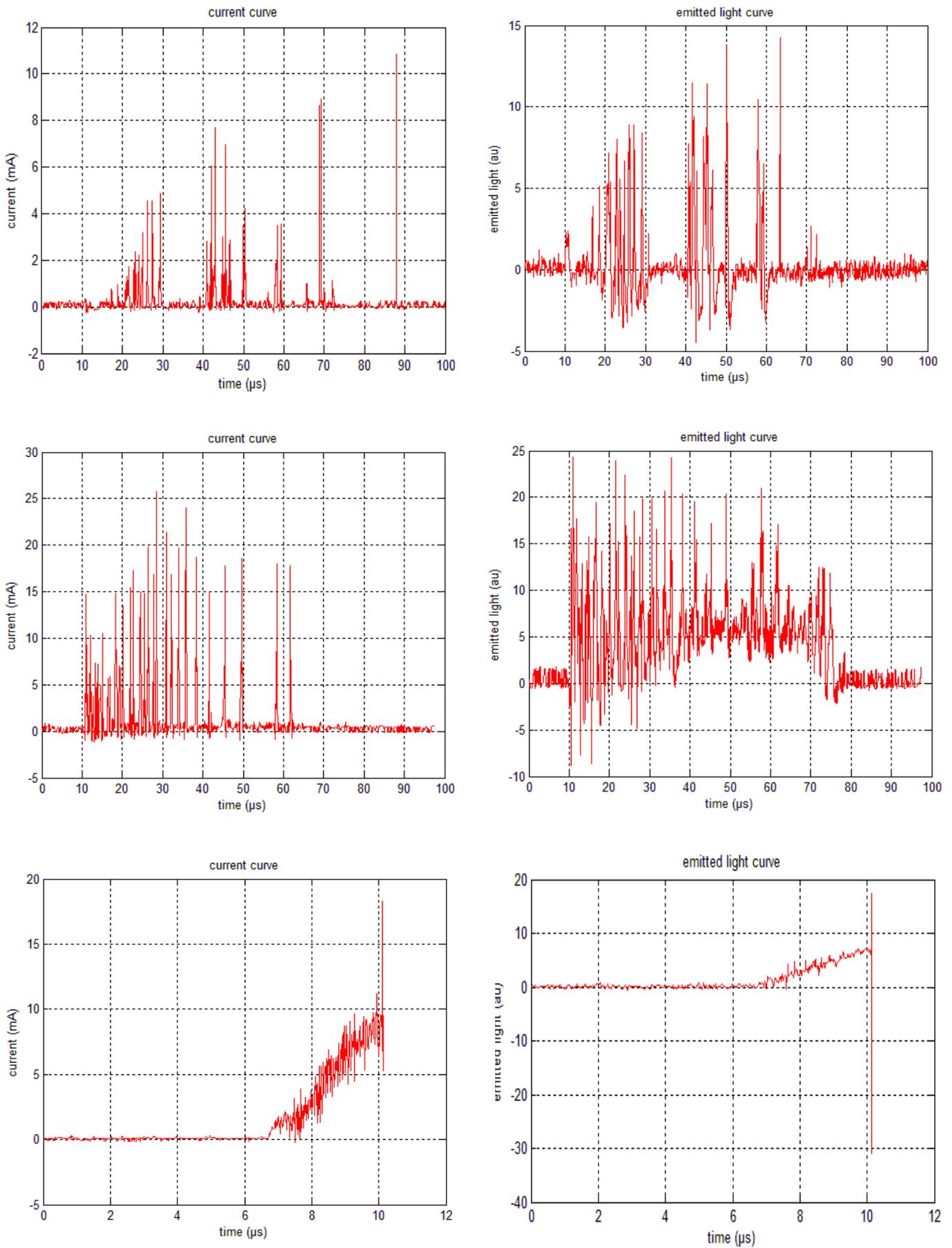


Figure III.4. Différents types de courants et d'émissions Lumineuses enregistrés en polarité positive

III.6.1.1. Les streamers de classe « A »

Les streamers mis dans cette classe, sont généralement très lents, et apparaissent lors de décharges partielles de faible énergie, ce qui est facilement vu sur les courbes des figures (III.5) et (III.6). Cette classe regroupe des streamers obtenus pour de faibles niveaux de tension aussi bien en polarité négative que positive.

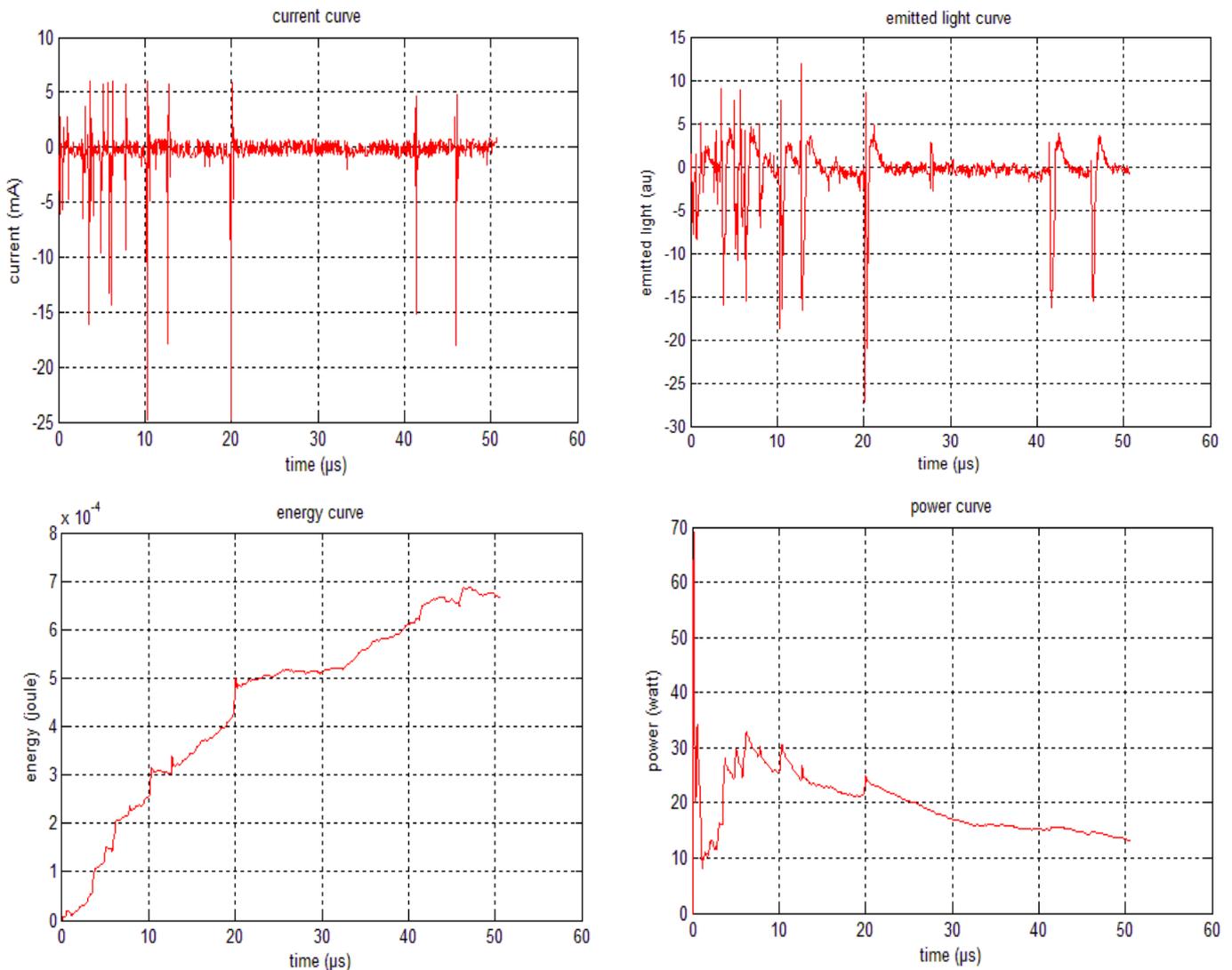


Figure III.5. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « A » enregistrées en polarité négative avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondantes

En polarité négative, figure (III.5), les énergies intervenant sont généralement plus petites que (10^{-3}J). La variation de l'énergie en fonction du temps, pendant la propagation, est très irrégulière même si elle est grossièrement croissante et suit une progression relativement lente et quasi logarithmique et, les courbes de courant sont formées de pics rapides et brefs très espacés dans le temps, tous suivis de retours à zéro étalés dans le temps.

Alors qu'en polarité positive, figure (III.6), même si les énergies fournies par la source sont de même ordre de grandeur et suivent la même allure de variation, les courbes de courants sont

constituées, dans ce cas, de pics beaucoup plus rapprochés les uns des autres aussi suivis de retours à zéro. Les streamers correspondants sont quand même plus rapides que ceux obtenus en polarité négative.

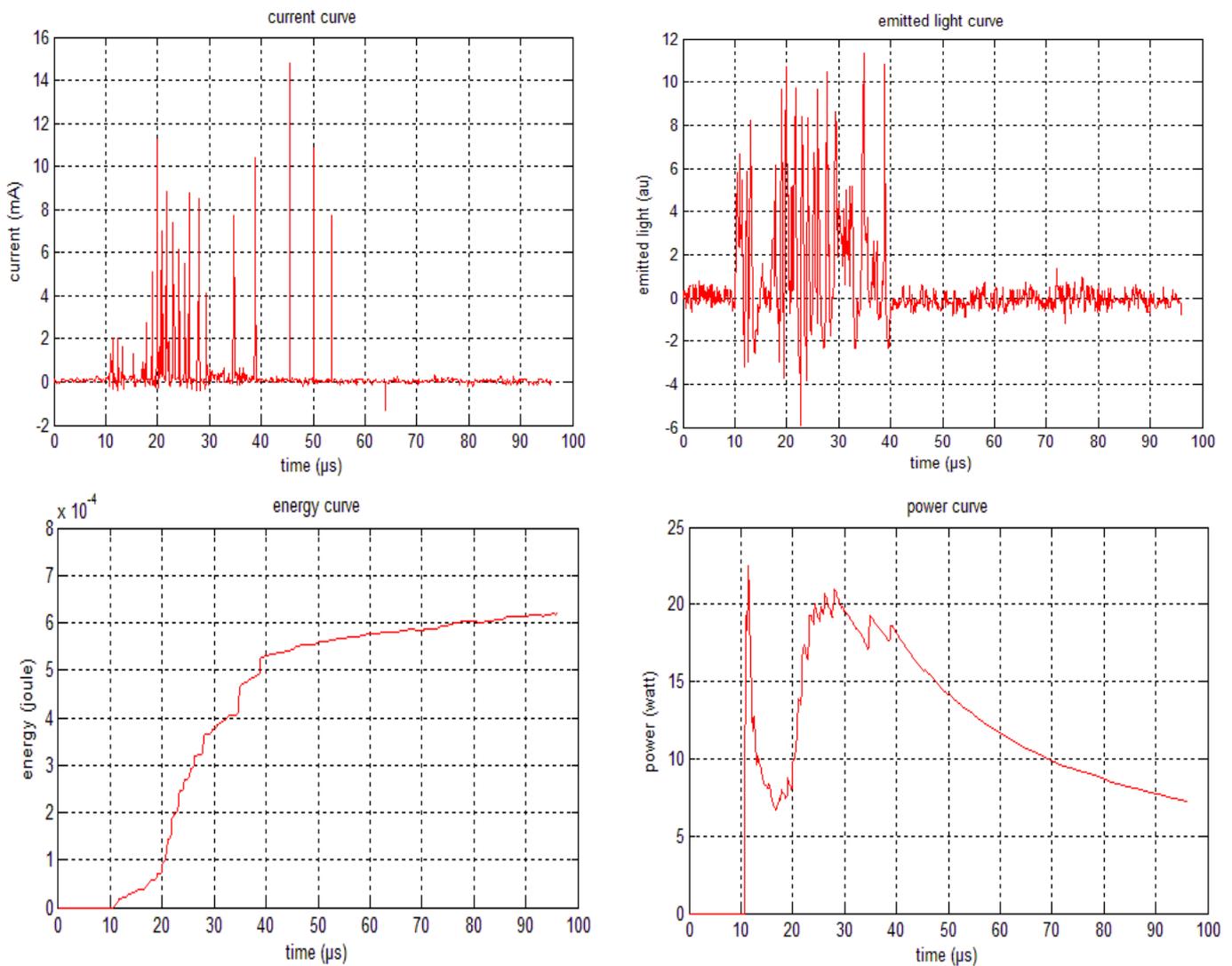


Figure III.6. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « A » enregistrées en polarité positive avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondante

Sur les figures précédentes, nous avons aussi pris le soin de présenter les courbes de variation de la puissance moyenne en fonction du temps. Cette puissance qui, pour les streamers de classe (A), prend des valeurs finales (à la fin de l'enregistrement) très faibles et qui dépassent rarement les 20W commence par connaître des valeurs bien plus importantes dès l'apparition des premiers pics de courant. Mais ceci ne dure que le bref temps d'un ou deux pics, après quoi nous remarquons une décroissance de la valeur de la puissance presque aussi rapide que son augmentation. Suite à cela, la variation de la puissance connaîtra quelques fluctuations suivies d'une lente diminution qui aboutira à la valeur finale servant au classement du streamer. Le début de cette dernière phase de variation (la diminution lente) marque la fin de la partie la plus

active de la décharge partielle. Le changement de polarité de la tension ne cause pas de sérieux changements sur les courbes de variation de la puissance.

III.6.1.2. Les streamers de classe « B »

Dans cette classe nous retrouvons des streamers plus fort que ceux de la classe « A » et aussi plus rapides (figures III.7 et III.8). L'énergie intervenant durant ces pré-claquages, quoique plus grande que celles des précédents, ne dépasse pratiquement jamais les (7.10^{-3} J) pour les deux polarités. D'ailleurs, la polarité de la tension n'a même plus d'importants effets sur la forme des courbes de courant.

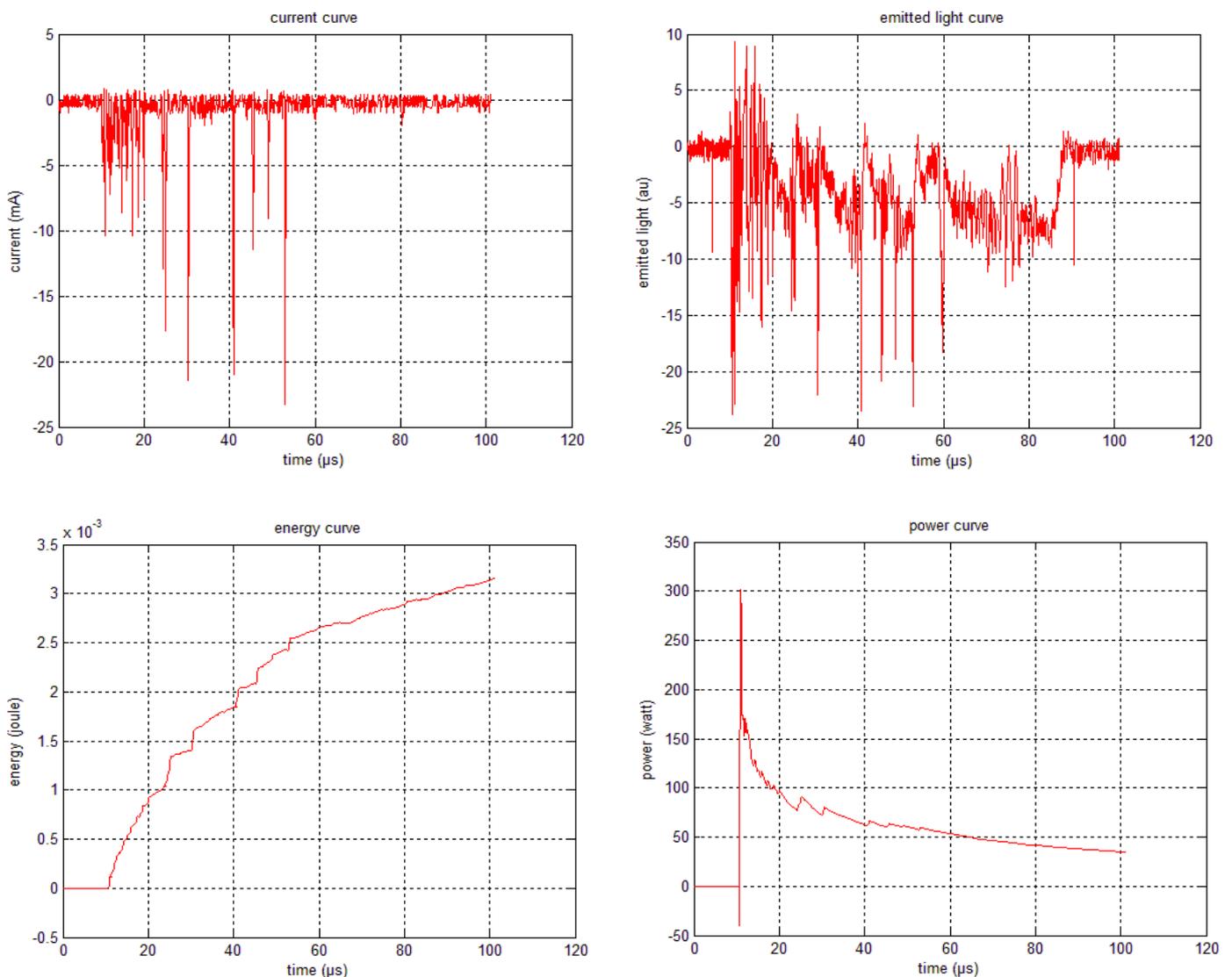


Figure III.7. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « B » enregistrées en polarité négative avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondante

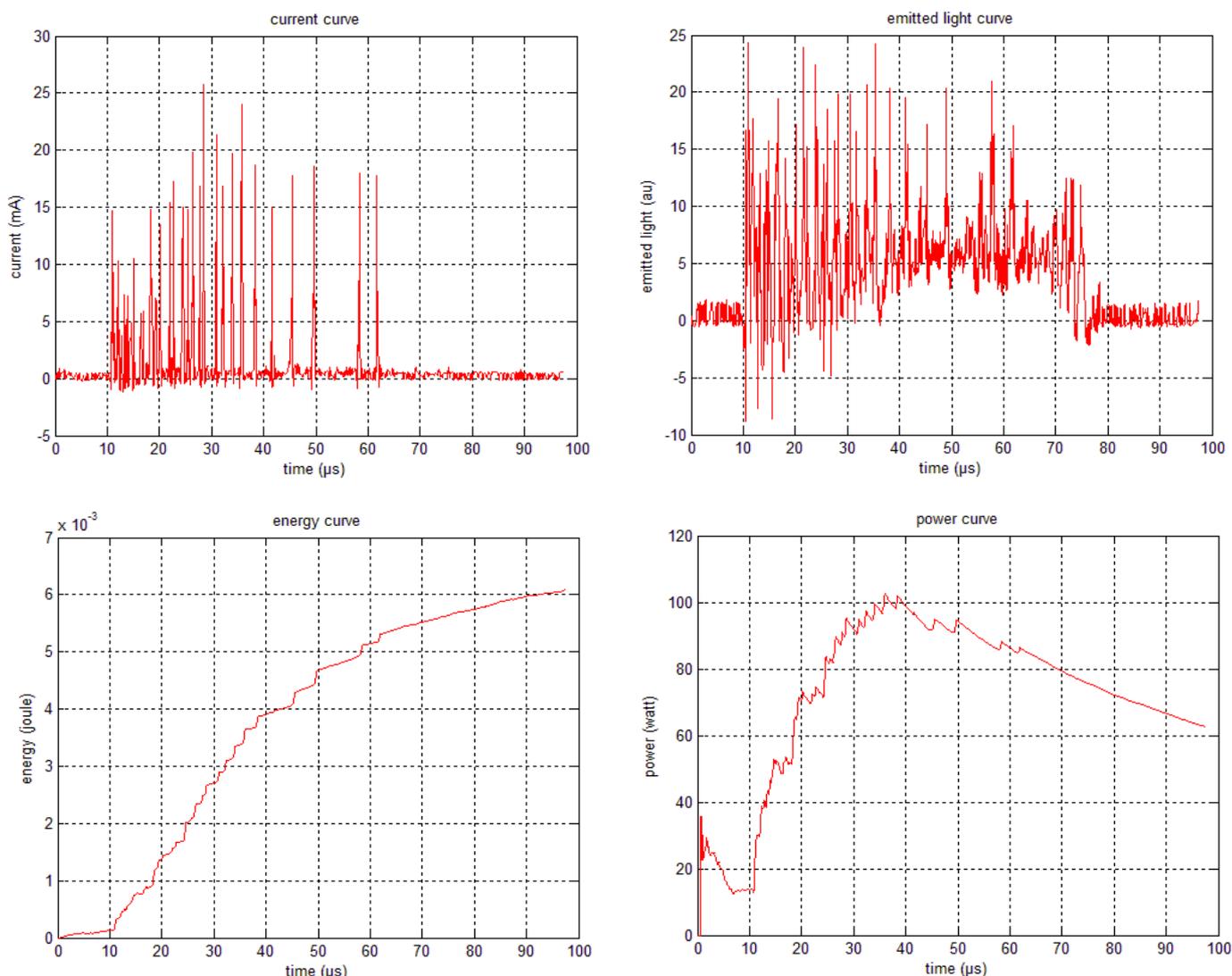


Figure III.8. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « B » enregistrées en polarité positive avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondante

Les courbes d'énergie montrent une variation plus régulière avec des paliers moins larges et conserve l'allure logarithmique qui devient plus rapide. Cette rapidité est plus marquée en polarité positive, ce qui explique les valeurs plus élevées de l'énergie sous cette polarité comparativement à celles retrouvées en polarité négative.

Les puissances calculées pour cette famille de décharges partielles ont une variation assez dépendante de la polarité.

En polarité négative, les puissances suivent des variations très semblables à celles retrouvées pour les streamers de la classe (A), alors qu'en polarité positive la variation de la puissance commence par un pic de petite amplitude suivi d'une diminution plus ou moins lente, et la valeur maximale n'est atteinte qu'à la suite d'une croissance assez étalée dans le temps. Ce maximum, qui marque encore une fois la fin de la partie la plus active du streamer, est suivi de la même

décroissance lente observée dans les pré-claquages de classe (A) qui mène à la valeur finale de la puissance correspondante à la fin de l'enregistrement. Elle est quand même plus élevée pour les événements de classe (B). Cette valeur varie autour de 60W.

III.6.1.3. Les streamers de classe « C »

Ce sont les streamers les plus forts et qui mènent généralement à des claquages complets des huiles et donc à la formation d'arcs (figures III.9 et III.10). Ce genre de décharges partielles est le plus nocif et le plus destructeur des huiles diélectriques, donc responsable de la plus grande accélération du processus de vieillissement.

En polarité négative, il est rare d'obtenir des streamers aussi forts, c.à.d. pouvant mener vers la formation d'arc. La figure (III.9) montre que dans ce cas l'arc a bel et bien lieu, mais il a tendance à redispairaitre tout seul et très rapidement (quelque μs) sans provoquer la coupure du système de mesure. Par contre, il provoque la saturation des enregistreurs de courant et des capteurs de lumière.

La figure suivante montre que l'énergie, dans ce cas, retrouve sa forme de variation par paliers qui sont beaucoup plus marqués. Mais il faut noter que le calcul de l'énergie en utilisant les valeurs enregistrées du courant n'est pas très fiable vu que les valeurs réelles de ce dernier sont tellement fortes que le système de mesure se sature pendant la décharge partielle. La courbe de puissance, quand à elle, montre une augmentation très rapide pour atteindre une valeur maximale elle-même très douteuse pour la même raison précédente, mais qui sera prise en considération lors du classement du streamer au lieu de la valeur finale.

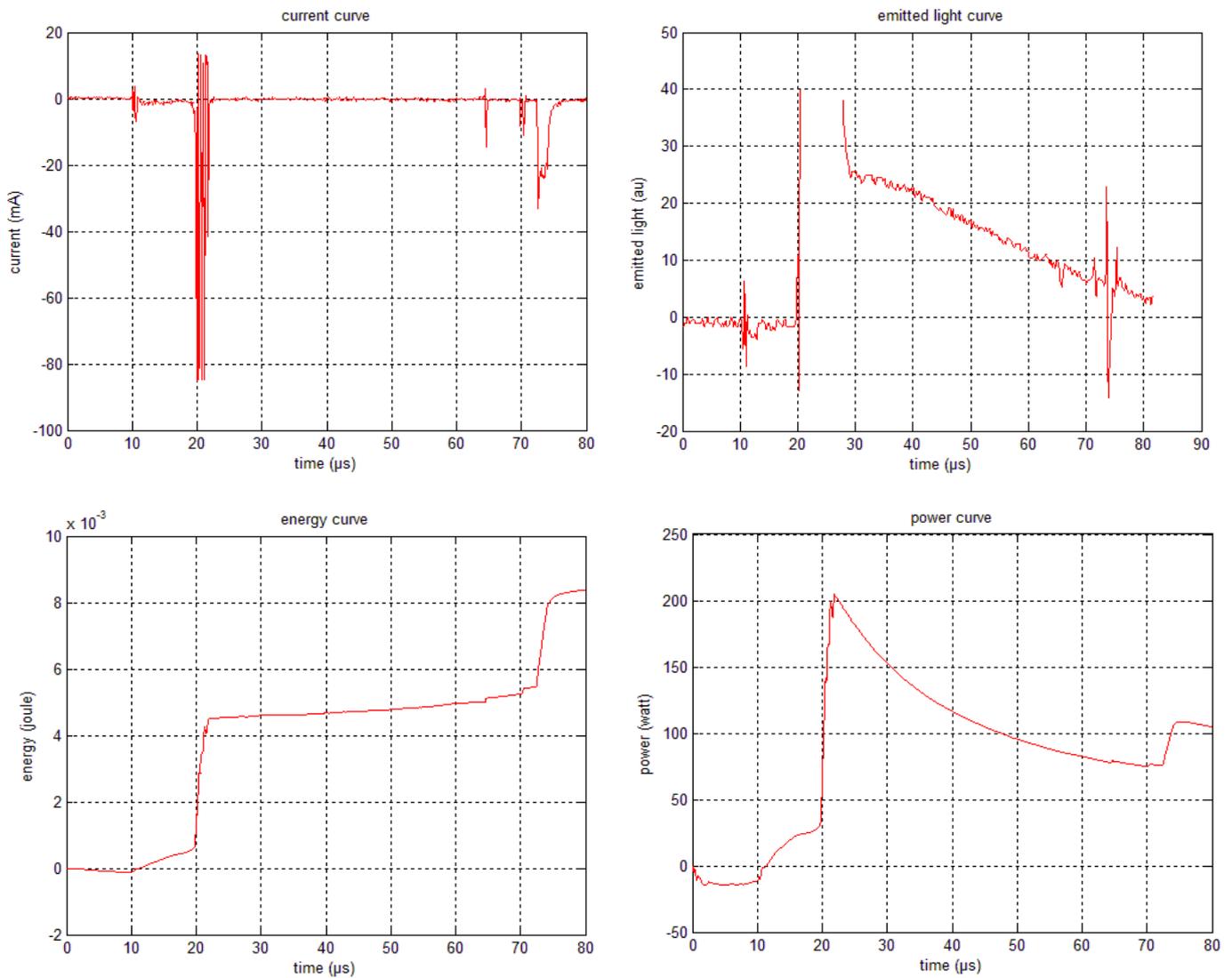


Figure III.9. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « C » enregistrées en polarité négative avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondantes

En polarité positive (figure III.10), dans les courbes de courants, nous remarquons certes l'existence de pics, mais ils sont de faible amplitude et sans aucun retour à zéro. Ce sont en fait des oscillations autour d'un courant permanent qui ne cesse d'augmenter jusqu'au moment du claquage ou on voit apparaître des pics de très fortes amplitudes qui saturent les dispositifs d'enregistrement. Ils correspondent à l'apparition de l'arc à la suite duquel le système de mesure est coupé.

Toujours sous la polarité positive, l'énergie des streamers de la classe (C), même si elle n'atteint que des faibles valeurs de même ordre de grandeur que celles retrouvées pour la classe(A), mais, pour cette fois, sa variation est très régulière et prend une allure exponentielle (sans présence de paliers) donc nettement plus rapide que la variation logarithmique en classe (A). Cette même allure est retrouvée sur les courbes de variation de la puissance associées aux mêmes streamers.

C'est justement cette rapidité de variation qui fait que la puissance arrive à de très grandes valeurs.

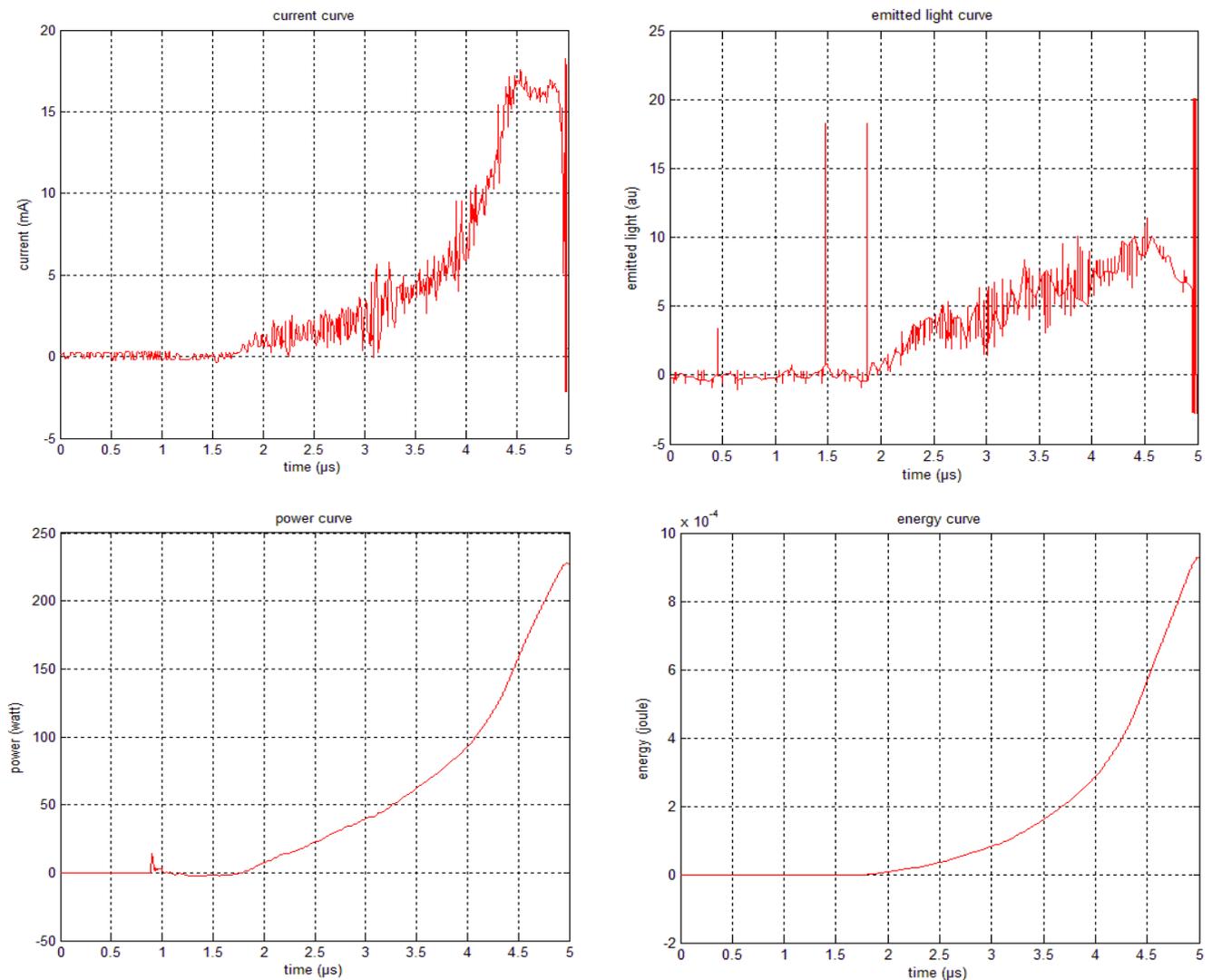


Figure III.10. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « C » enregistrées en polarité positive avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondantes

III.6.2. Puissance des décharges partielles

En résumé de ce qui précède, en voyant les différentes courbes de variations des énergies associées aux streamers des trois classes, nous pouvons facilement remarquer que pour les streamers des classes (A et B), la variation se fait par palier correspondant aux pas successifs des streamers et a une allure logarithmique. Alors que pour les streamers de classe « C » en polarité positive, cette variation prend une allure exponentielle donc beaucoup plus rapide avec disparition des paliers.

Le traitement de l'importante quantité de courbes enregistrées nous a poussés à poser l'importante question suivante : Est-il réellement correct de classer les streamers en se basant sur le calcul de l'énergie mise en jeu ? Ce paramètre est-il suffisant ?

L'analyse attentive des résultats trouvés nous a permis de constater l'existence de situations où l'utilisation du critère énergie conduit à des conclusions fausses. Par exemple le calcul de l'énergie pour les streamers caractérisés par les courbes de courant de la figure (III.10) et figure (III.11) donne les valeurs de 1,2 (mJ) pour le streamer de la figure (III.11) et d'à peine 0,93 (mJ) pour celui de la figure (III.10). Ceci pourrait mener à conclure que le streamer de la figure (III.10) est moins énergétique que celui de la figure (III.11). Ce qui est en réalité complètement faux. Le streamer de la figure (III.10) est de classe « C ». Il se termine par un arc alors que celui de la figure (III.11) est beaucoup moins énergétique et appartient à la classe « A ». Nous avons donc pensé à un nouveau critère de classification qui tienne compte, en plus de l'énergie électrique fournie par la source, du temps de propagation du streamer et qui n'est autre que **la puissance moyenne**.

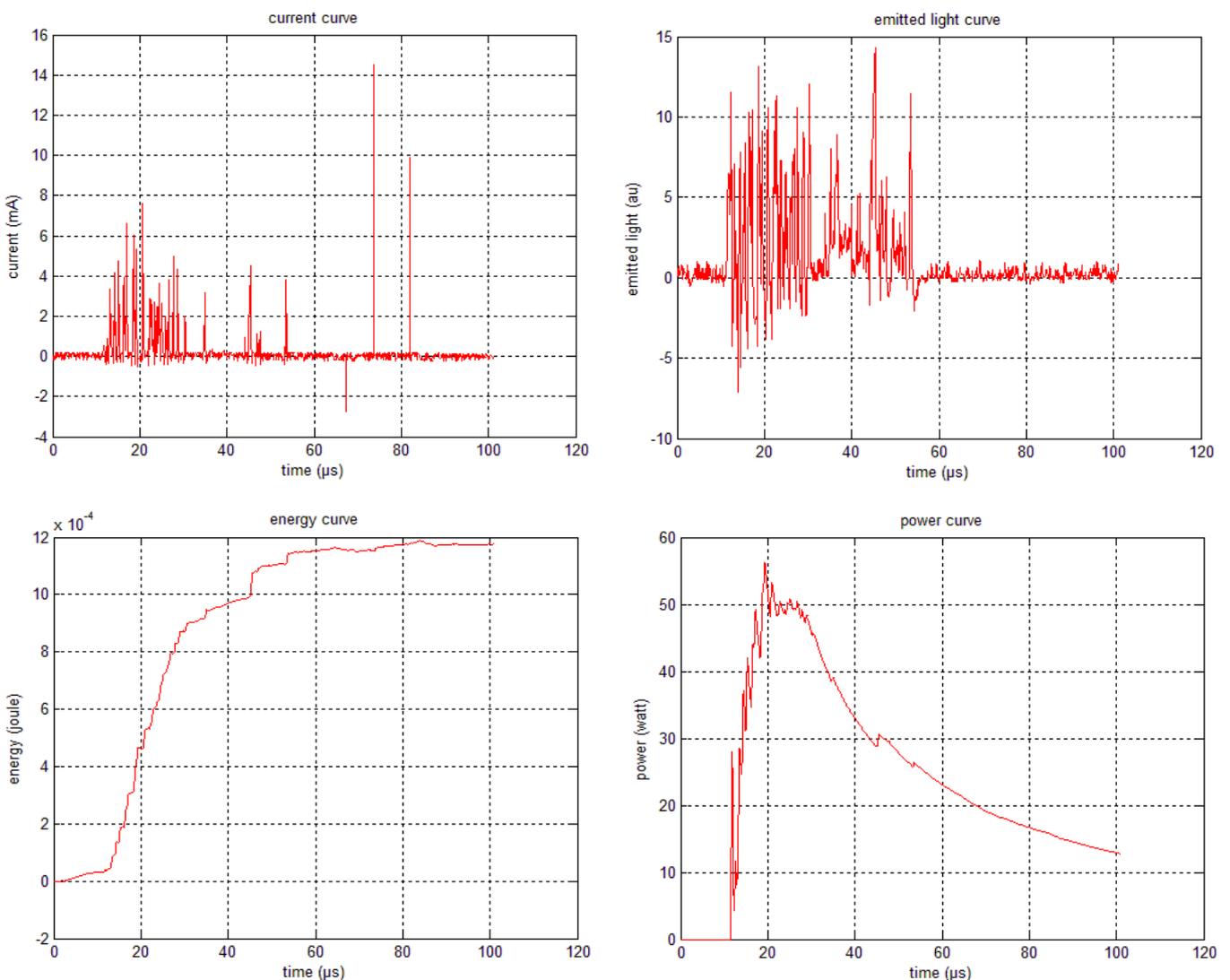


Figure III.11. Courbes typiques de courant et d'émission Lumineuse associées à un streamer de classe « A » enregistrées en polarité positive avec les courbes de variation de l'énergie et de la puissance moyenne correspondantes

La puissance du pré-claquage de la figure (III.10) vaut 225 W et est donc incomparablement plus grande que celle du streamers de la figure (III.11) qui ne vaut que 13.5 W. Ce critère remet donc les choses dans l'ordre en reclassant chaque streamer dans sa réelle catégorie. Le critère de la puissance est alors plus approprié au classement des streamers que le critère énergétique. Il serait peut être plus juste de dire que tel streamer est plus puissant qu'un autre que de dire qu'il est plus énergétique. Le tableau (III.1) montre quelques exemples de calcul.

N° de la figure	III.5	III.6	III.7	III.8	III.9	III.10	III.11
Tension (Kv)	-42	34	-50	63	-62	48	54
Energie ($\times 10^{-4}$ J)	6,8	6,2	31,5	60	84	9,3	12
Puissance Moyenne (W)	14	7,5	36	64	110	225	13,5

Tableau III.1. Résumé des Energies et Puissance moyenne des streamers des trois classes.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, un résultat important a été trouvé. En effet l'analyse énergétique, mais aussi le calcul de la puissance moyenne correspondant à chaque événement nous ont permis d'établir un nouveau critère de classement des streamers. En tenant compte du temps de propagation, cela nous évite les erreurs de classement causées par le critère énergétique. Ainsi Les phénomènes de pré-claquage sont classés en trois principaux types du point de vue de leur puissance et non de leur énergie. Le streamer le plus fort est celui qui a la plus grande puissance et pas forcément la plus grande énergie.

La classe « A » correspond aux streamers les moins puissants. L'énergie électrique injectée par la source dans ce cas est très faible et varie selon une allure logarithmique assez lente, ce qui fait que la puissance moyenne correspondante ne dépasse pas les (20W). Des streamers plus puissants sont regroupés dans la classe « B » et se caractérisent par des énergies de variation toujours logarithmique mais légèrement plus rapide que la précédente, et des puissances moyennes qui peuvent atteindre les (60W). Les streamers les plus puissants appartiennent à la classe « C ». Ce sont les seuls pour les quels l'énergie suit une variation à allure exponentielle donc extrêmement rapide. C'est justement cette même allure que suit la variation de la puissance pour atteindre très vite des valeurs très grandes qui dépassent facilement les (150W).

Chapitre IV

Analyse Fréquentielle, Corrélations et modèle de propagation

IV.1. Introduction

Les décharges partielles sont donc réparties en trois classes du point de vue de leur puissance. L'analyse fréquentielle des courbes, de courant et des émissions lumineuses, associées à chaque classe sera faite dans le but de tenter de caractériser chacune d'elles par une empreinte spectrale spécifique. Si le résultat de cette analyse est positif, nous établirons alors un nouveau critère qui servira à déceler les streamers de classe « C » (qui se terminent par des arcs). Une telle analyse sera probablement d'un grand intérêt pour les chercheurs qui tentent de comprendre les phénomènes qui se produisent à l'intérieur de l'espace inter-électrode durant les amorçages et les propagations des pré-claquages.

Cette compréhension sera facilitée par l'élaboration d'un modèle électrique qui représente la propagation des streamers. Dans ce chapitre nous essaierons, en plus de l'étude de la corrélation courant/lumière, d'apporter notre modeste contribution dans la recherche d'un tel modèle.

IV.2. Analyse fréquentielle

IV.2.1.1. Les streamers de classe « A »

Les courbes de courants correspondantes aux streamers de classe « A », c.à.d. les moins puissants, possèdent des spectres très riches en fréquences qui peuvent atteindre un maximum de 40MHz pour certains cas, et pour lesquels la fréquence de coupure atteint 10MHz. Il est à noter que pour de tels courants la composante continue (correspondante à une fréquence nulle), malgré son existence, a une amplitude comparable, si ce n'est plus petite que celle des fréquences plus élevées formant le spectre fig. (IV.1).

Les courbes des émissions lumineuses correspondantes aux décharges partielles de classe « A », contrairement aux courbes de courant, présentent des spectres de fréquence qui atteignent au

maximum 2 à 3MHz et qui sont dominés par une composante continue dont l'amplitude dépasse fortement celles des autres fréquences plus grandes, ce qui fait que la fréquence de coupure est pratiquement nulle. Ceci traduit le fait que la lumière soit émise de façon quasi continue durant la propagation des streamers par des phénomènes luminescents qui ont lieu à l'intérieur du liquide diélectrique ou de la phase gazeuse et qui ne sont pas forcément liés au passage de courant. Ces phénomènes peuvent avoir lieu même en absence d'impulsions de courant. Ceci peut être confirmé par les courbes des émissions lumineuses elles mêmes où nous remarquons de très brefs retours à zéro à la suite d'impulsions fortes et rapides. En opposition à cela, les courbes de courant sont constituées précisément de pics brefs et rapides tous suivis d'un retour à zéro mais qui sont, quant même, parfaitement synchronisés avec ceux des émissions lumineuses.

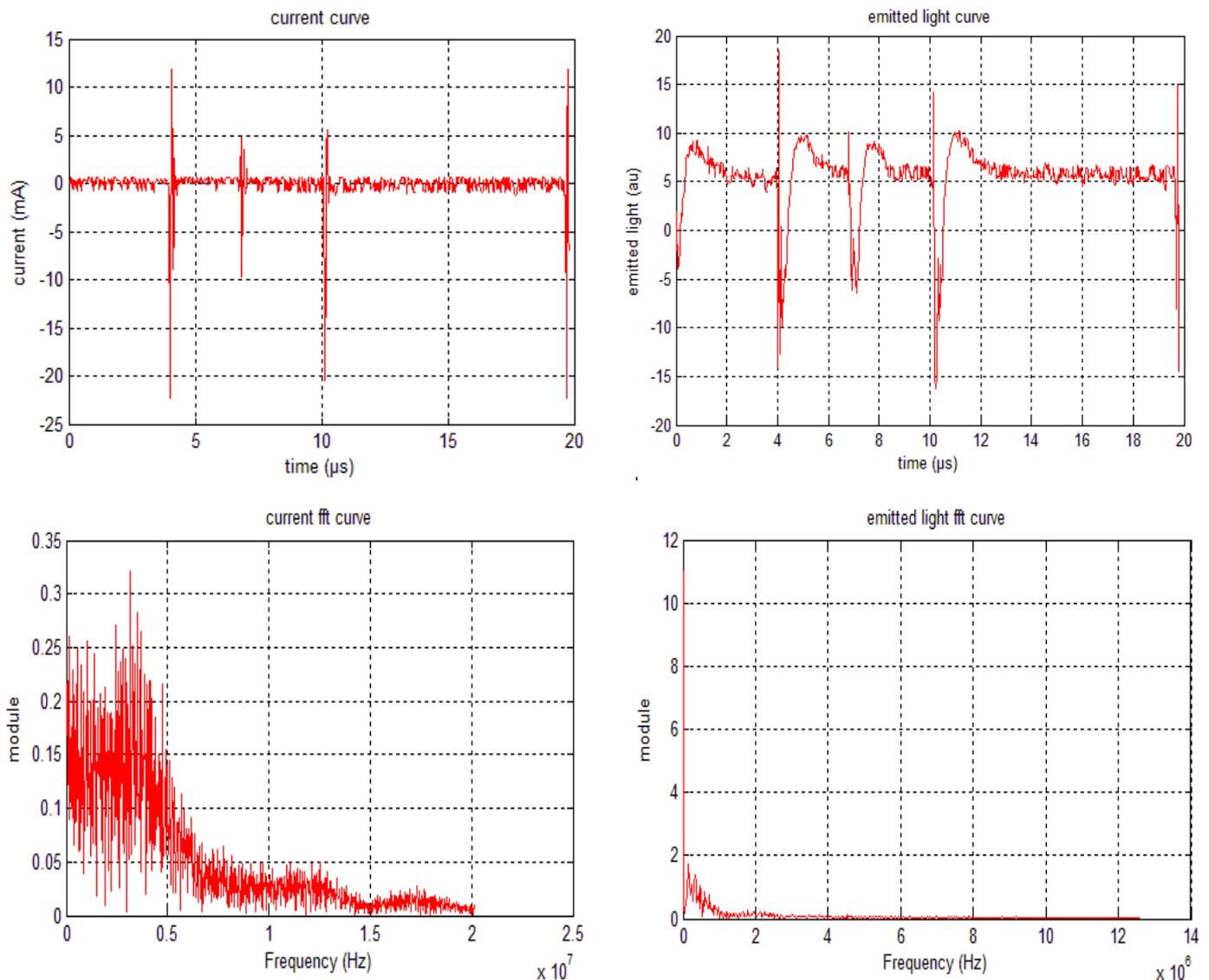


Figure IV.1.a. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondante à un streamer de classe « A » en polarité négative avec les FFT correspondantes

Les observations précédentes concernent effectivement la grande majorité des streamers à faible énergie. Cependant, nous avons enregistré des cas d'exception. La figure (IV.2) montre les courbes de courant et d'émission lumineuse de décharges partielles de faible énergie ainsi que leurs F.F.T respectives, mais pour lesquelles nous remarquons une inversion de situation. Pour ce cas particulier, c'est le spectre de courant qui est dominé par une composante continue d'amplitude très grande devant celles des autres fréquences alors que le spectre des émissions lumineuses est plus étalé en fréquence et l'amplitude de la composante continue est comparable à celle des autres fréquences plus élevées.

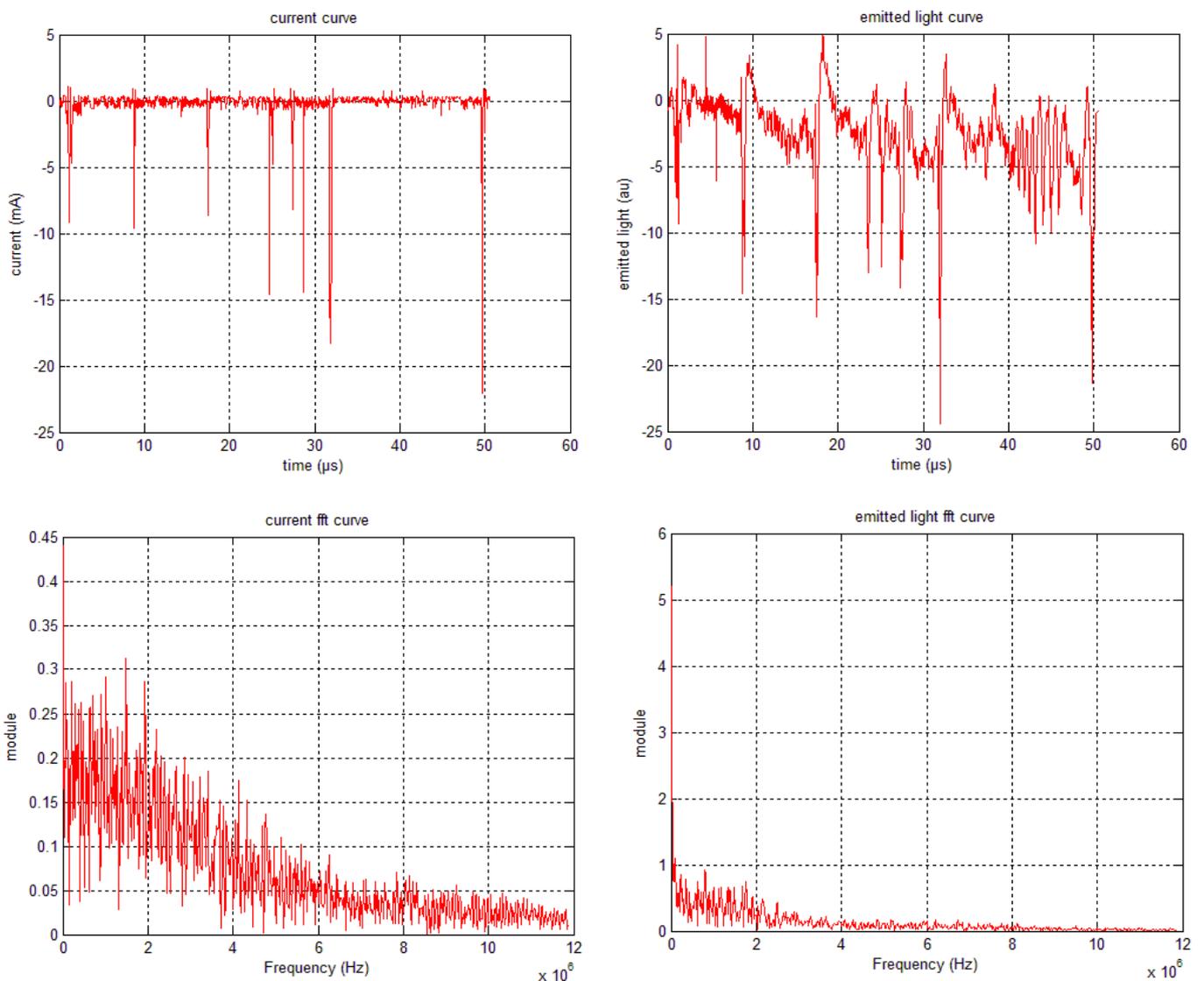


Figure IV.1.b. Courbes de courant et d'émission Lumineuse correspondantes à un streamer de classe « A » en polarité négative avec les FFT correspondantes

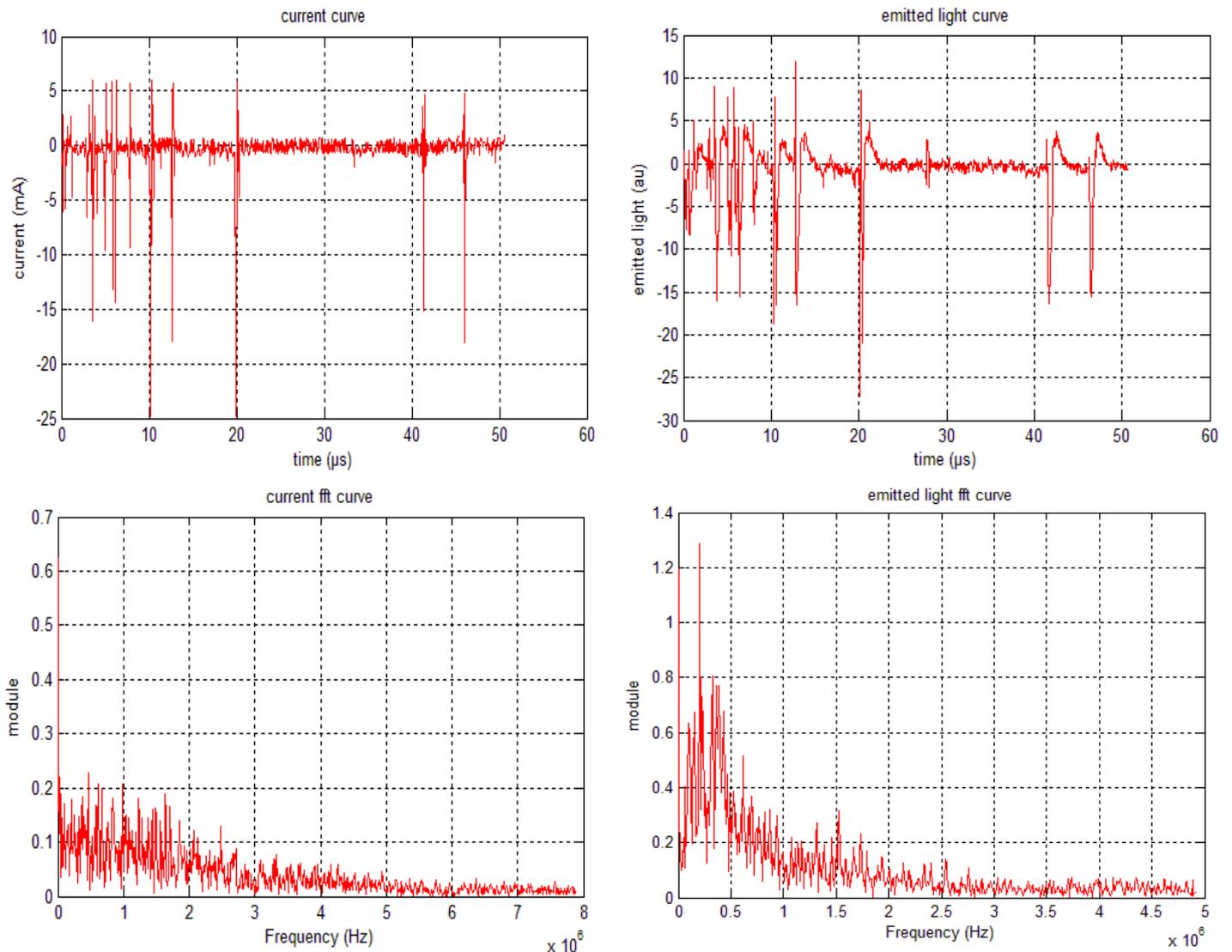


Figure IV.2. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « A » en polarité négative avec les FFT correspondantes

Il est à noter que dans tous les cas (même les cas exceptionnels), la composante continue du spectre fréquentielle des courbes de courant ne correspond absolument pas à l'existence d'un courant qui passerait continuellement à travers les électrodes pendant la propagation des streamers. Elle ne porte en fait que le vulgaire sens mathématique de valeur moyenne des différents pics de courant.

IV.2.1.2. Influence de la polarité

Les courbes de courant enregistrées pour les streamers qui ont lieu sous une polarité positive semblent être semblable à celles enregistrées sous une polarité négative, mais l'analyse fréquentielle montre qu'en polarité positive les courbes de courant possèdent un spectre qui peut s'étaler jusqu'à 10MHz et est dominé par une composante continue dont l'amplitude est nettement plus grande que celles des autres fréquences plus élevées. Ce qui fait que la fréquence

de coupure se trouve pratiquement réduite à zéro (ce qui n'est pas le cas en polarité négative)

figure (IV.3).

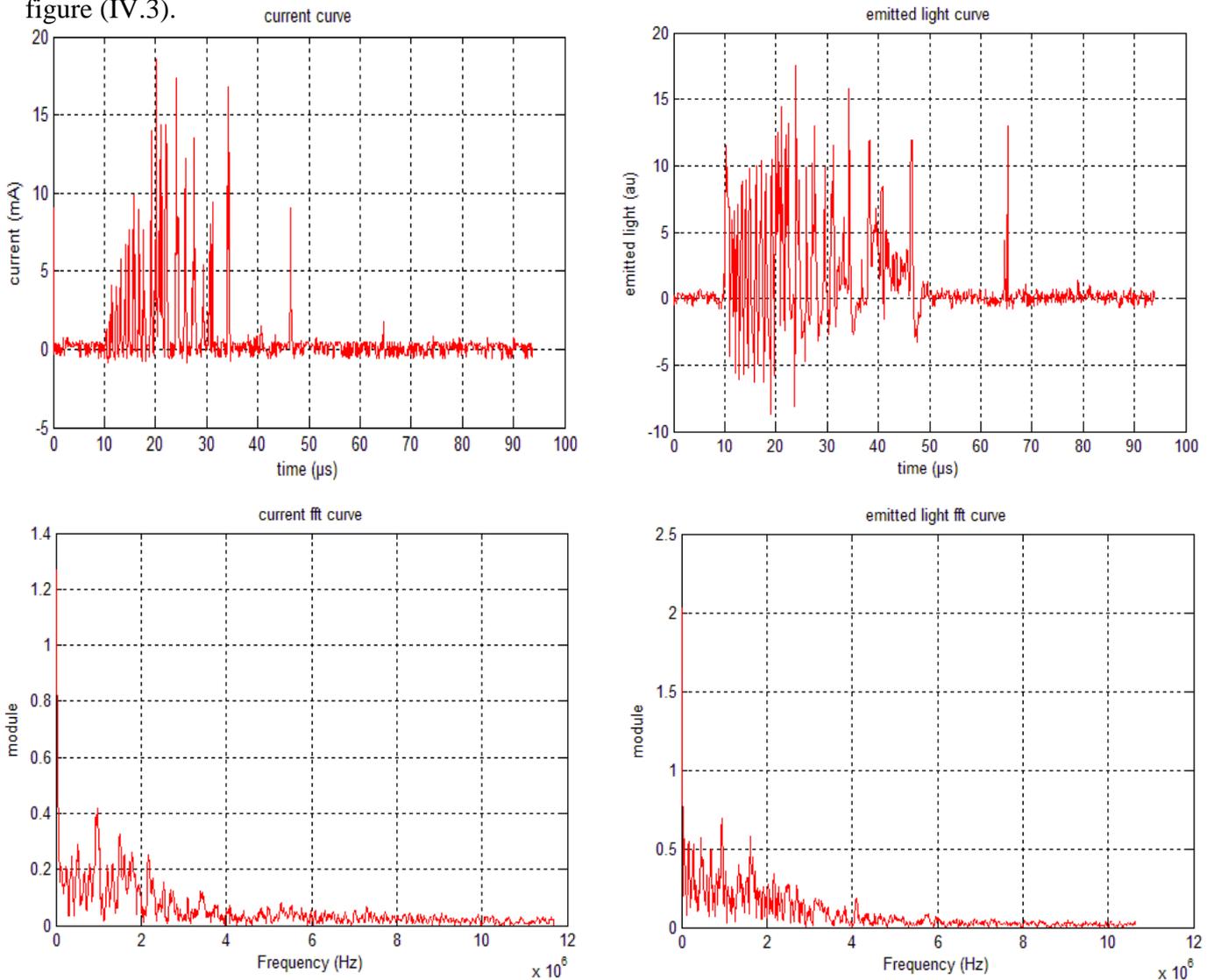


Figure IV.3. Courbes de courant et d'émission Lumineuse correspondantes à un streamer de classe « A » en polarité positive avec les FFT correspondantes

Il est à noter que les impulsions de courant, en polarité positive, ne sont pas tous suivies d'un retour à zéro, le courant reste donc non nul pendant de petits intervalles de temps interrompus par des absences de courant plus au moins durables.

Concernant les courbes des émissions lumineuses associées aux streamers en polarité positive, elles montrent une ressemblance avec les courbes de courants correspondants aux même streamers et sont donc constituées de pics assez condensés avec des intervalles de non retour à zéro quand même plus larges et qui existent même en absence de pics de courant.

L'analyse fréquentielle montre que les spectres des courbes de lumière sont, eux aussi, très similaires aux spectres des courbes de courant et ont donc pratiquement les mêmes caractéristiques. Il faut remarquer que ces spectres ressemblent aussi à ceux des courbes de lumière en polarité négative.

Il faut signaler que la dominance de la composante continue dans les spectres précédents ne signifie nullement l'existence de courants (ni d'émissions lumineuses d'ailleurs) ininterrompus durant toute la durée du streamer sous la polarité positive.

IV.2.2.1. Les streamers de classe « B »

Les spectres de fréquences des courbes de courants et celles des émissions lumineuses associées au streamers de moyenne énergie ont pratiquement les mêmes formes. Ils sont dominés par des composantes continues de très forte amplitude mais sont beaucoup moins larges que les spectres de fréquence des streamers moins puissants de la classe précédente. Ils sont limités à 4 ou 5 MHz (figure IV.4).

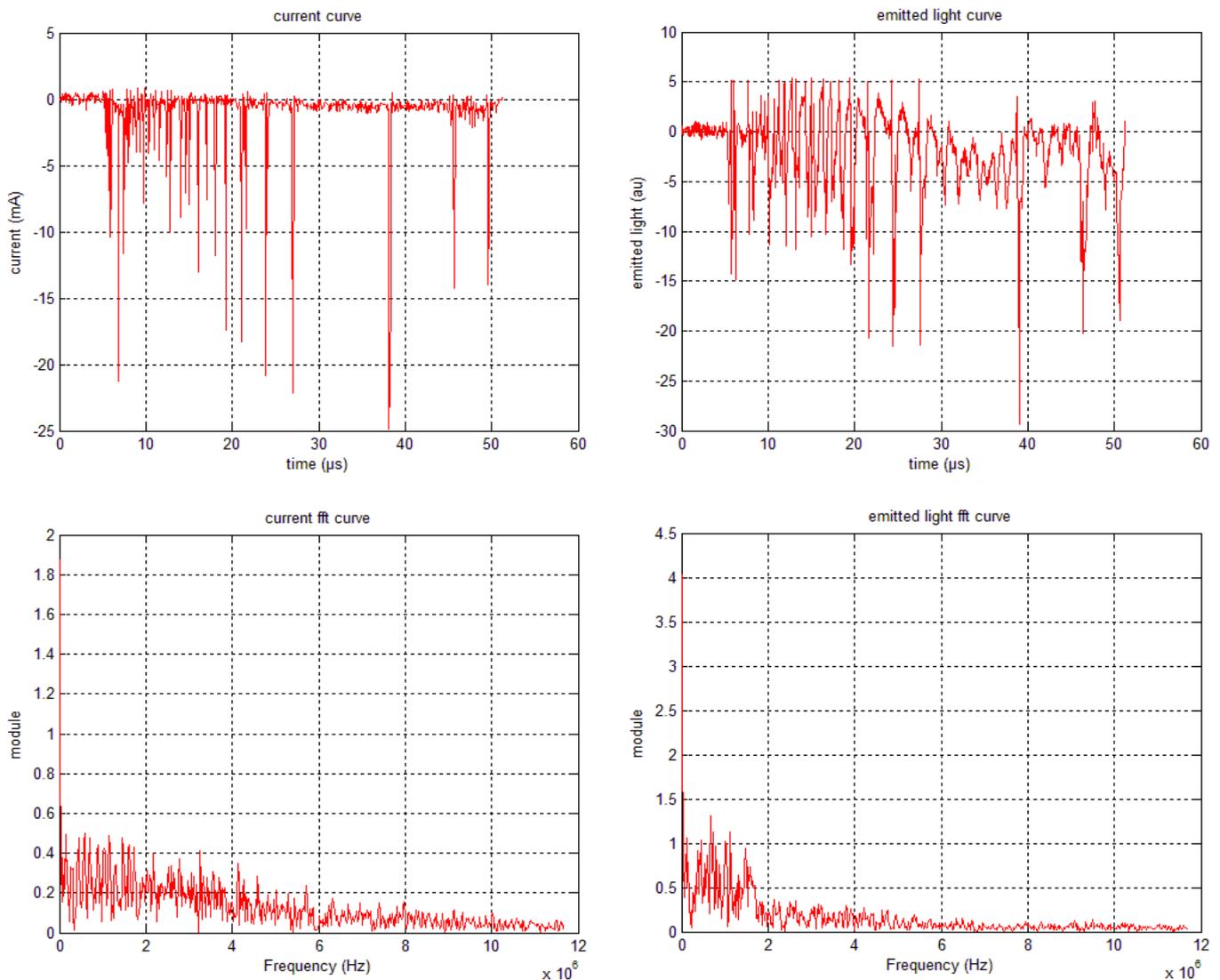


Figure IV.4.a. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondantes à un streamer de classe « B » en polarité négative avec les FFT correspondantes

Pour cette classe de streamers, les courbes de courant sont globalement constituées de pics plus fréquents et plus rapprochés les un des autres dans le temps (par rapport aux courbes de courant des pré-claquages de classe « A »), et montrent l'apparition de quelques pics non suivis de retour à zéro immédiat surtout au début de la propagation. La composante continue du spectre garde toujours son sens de valeur moyenne malgré l'existence de très courts intervalles de temps où le courant est maintenu non nul.

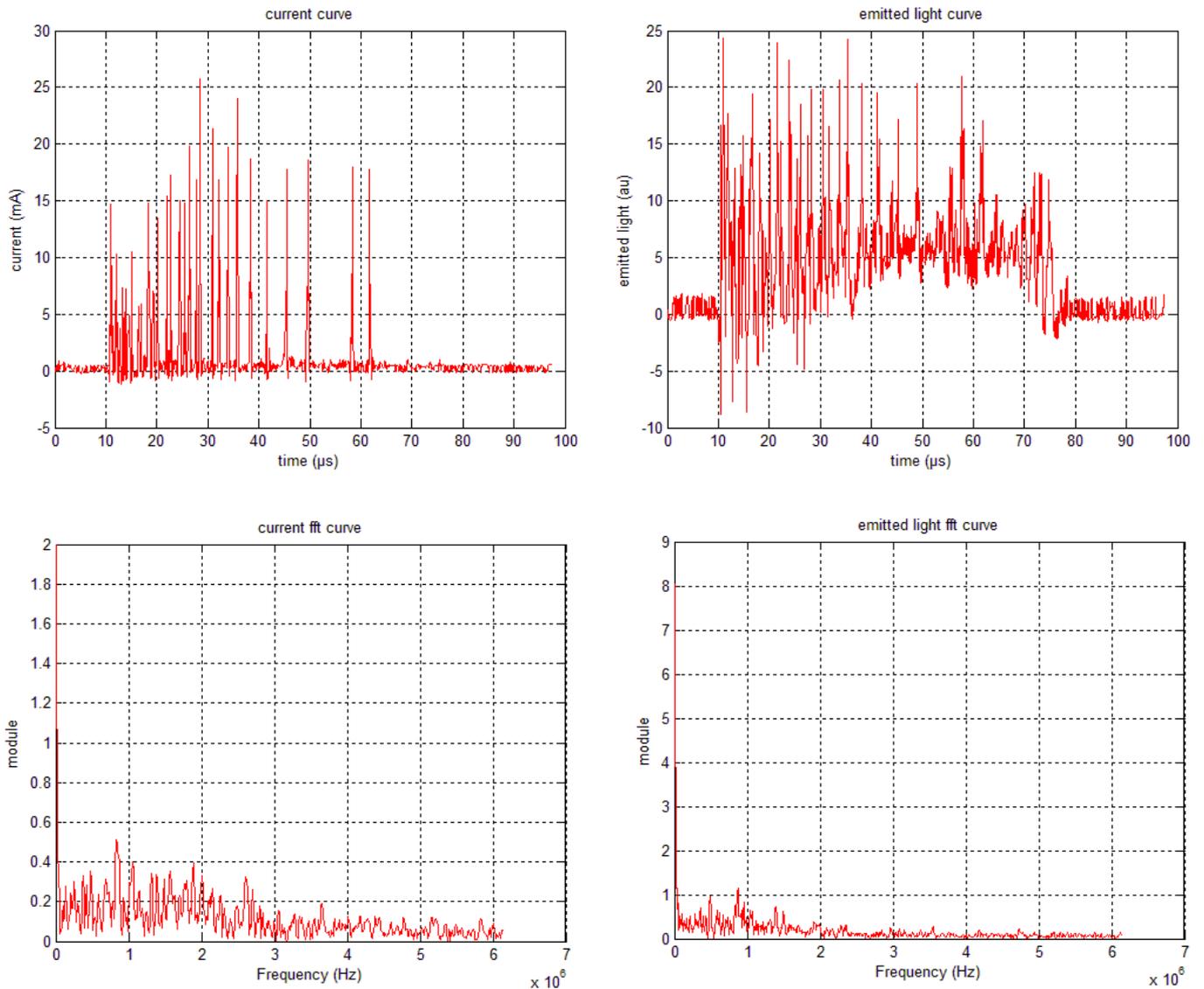


Figure IV.4.b. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondantes à un streamer de classe « B » en polarité positive avec les FFT correspondantes

Les courbes des émissions lumineuses, quant à elles, sont aussi constituées de pics plus rapprochés, qui s'éloignent les un des autres au fur à mesure que le streamer avance. Même si ces pics sont suivis de retour à zéro au début de la propagation, les courbes de lumière ont tendance à s'éloigner globalement du zéro pendant d'assez larges intervalles de temps avec l'avancée du streamer.

IV.2.2.2. Influence de la polarité

Il faut noter que la polarité de la tension de génération des streamers de moyenne puissance n'a pas grand effet sur la contenance spectrale des courbes de courants ainsi que celles des émissions lumineuses. Les courbes de courant sont similaires à celles de la polarité négative, mais celles des émissions lumineuses montrent que la lumière a une composante continue réelle (avec bien sûr la présence de pics) continuellement émise avec une intensité qui augmente jusqu'à l'instant de disparition des impulsions de courant. Après quoi, elle décroît assez rapidement et s'annule. Cette période de décroissance peut représenter la phase d'extinction du streamer (figure IV.4).

IV.2.3.1. Les streamers de classe « C »

Pour cette classe de décharges partielles, en polarité positive, les spectres de fréquences des courbes de courants et ceux des courbes des émissions lumineuses sont très similaires et sont tous dominés par les composantes continues de très fortes amplitudes avec une sérieuse diminution de la largeur du spectre comparativement à ceux des autres classes. Leurs fréquences de coupure sont pratiquement nulles (figure IV.5).

Dans cette catégorie de streamers, la composante continue retrouvée dans le spectre de fréquence correspond non seulement à une moyenne mathématique mais aussi effectivement à un passage continu de courant sans interruption durant toute la période de propagation. Cette composante est entourée de pics de petites amplitudes. La même remarque peut être faite pour les courbes des émissions lumineuses. Ceci peut vouloir dire que les phénomènes physicochimiques intervenants (à l'intérieur du liquide et de la phase gazeuse) durant la propagation des streamers de faible puissance de classe « A » et qui sont représentés par les hautes fréquences des spectres, n'ont pas lieu durant la propagation des streamers de classe « C » ; ou alors pour mieux dire, n'ont pas le temps d'avoir lieu vu la grande rapidité et la forte puissance impliquée dans ce type de décharges partielles.

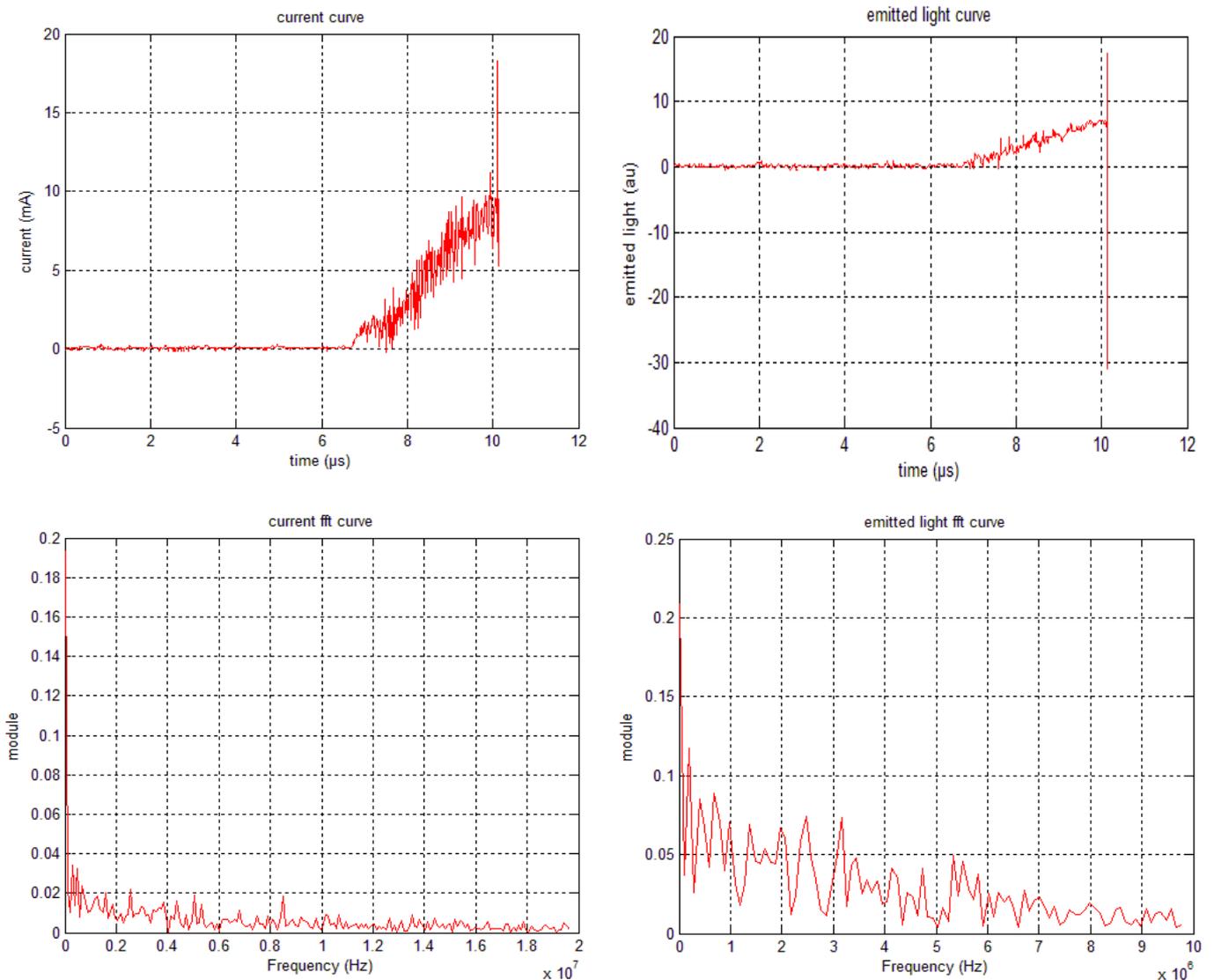


Figure IV.5.a. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « C » en polarité positive avec les FFT correspondantes

IV.2.3.2. Influence de la polarité

Pour cette famille de décharges partielles, il n'existe presque aucune ressemblance entre les enregistrements faits sous des polarités différentes. En polarité négative (figure IV.5.b) les courbes de courant sont toujours formées de pics (même s'ils sont très denses et de très fortes amplitudes) tous suivis de retours à zéro et qui saturent le dispositif de mesure sans le couper. Ceci a fait que les spectres obtenus peuvent ne pas refléter la réelle composition fréquentielle des courants.

Aussi, concernant les courbes des émissions lumineuses, la saturation des capteurs a causé l'arrêt de l'enregistrement pendant un intervalle de temps, ce qui nous a empêchés de pratiquer une FFT ou même d'autres calculs faisant intervenir ces courbes. Du moins nous pouvons, quand même, constater que la lumière reste émise longtemps après la disparition des impulsions de courant.

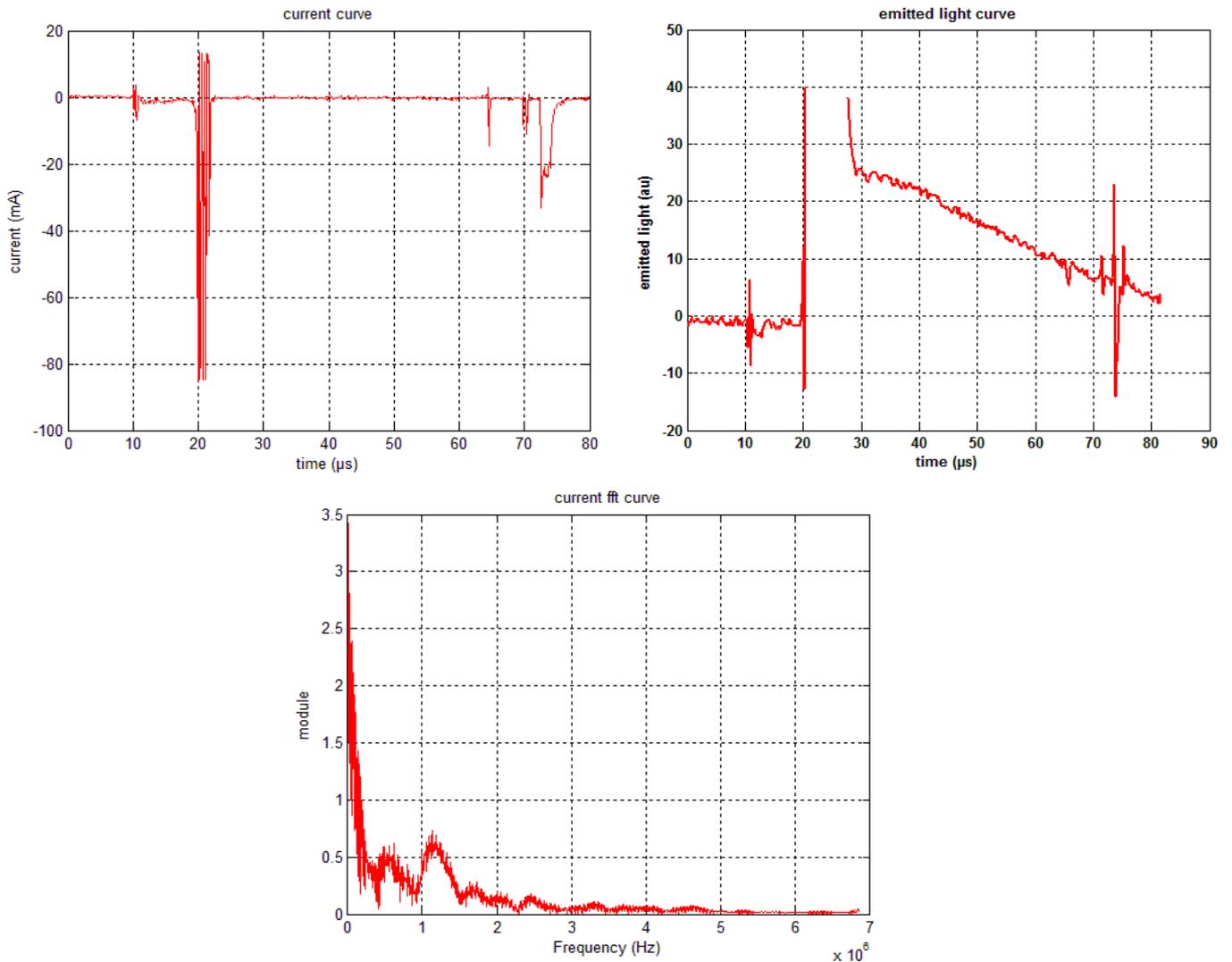


Figure IV.5.b. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondante à un streamer de classe « C » en polarité négative avec les FFT correspondantes

IV.3. Inter corrélation courant lumière

L'un des objectifs essentiels de notre travail est l'analyse de l'inter-corrélation entre les courbes de courants et celle des émissions lumineuses associées aux mêmes streamers et ce dans le souci de ne pas limiter l'étude à une simple constatation qualitative des ressemblances entre les courbes, mais plutôt faire une estimation quantitative de cette ressemblance pour obtenir une conclusion fondée à propos de l'utilité de chaque courbe dans le diagnostic des phénomènes de pré-claquage.

IV.3.1.1. Les streamers de classe « A »

Pour ce type de décharges partielles, la fonction d'auto-corrélation correspondant aux courbes de courant est dominée par un pic central de très forte amplitude comparativement aux autres pics qui correspondent à des décalages temporels différents de zéro. Ceci veut dire qu'il y a très

peu de ressemblance entre les différentes parties de la même courbe de courant (même si elles sont voisines). Le caractère aléatoire de ces courbes est donc clairement prouvé et l'éventuelle prédiction des valeurs futures du courant est totalement impossible.

Les mêmes remarques peuvent être faites concernant les fonctions d'auto-corrélation liées aux courbes des émissions lumineuses relatives aux mêmes streamers (figures IV.6) et IV.7).

La fonction d'inter-corrélation courant-lumière, pour les streamers de faible puissance est, elle aussi, dominée par un pic central d'amplitude très grande devant les autres pics. C'est justement l'amplitude de ce pic qui quantifie le degré de ressemblance entre les courbes pour un décalage temporel égale à zéro. Il est clair que pour des décalages différents de zéro, la ressemblance est pratiquement inexistante. Cette forme de la fonction d'inter-corrélation quantifie aisément la parfaite synchronisation des pics des courbes de courant avec ceux des courbes de lumière. Puisque les courbes des émissions lumineuses sont données en unités arbitraires, aucun commentaire ne peut, malheureusement, être fait concernant la signification de l'amplitude même du pic central ou des autres d'ailleurs.

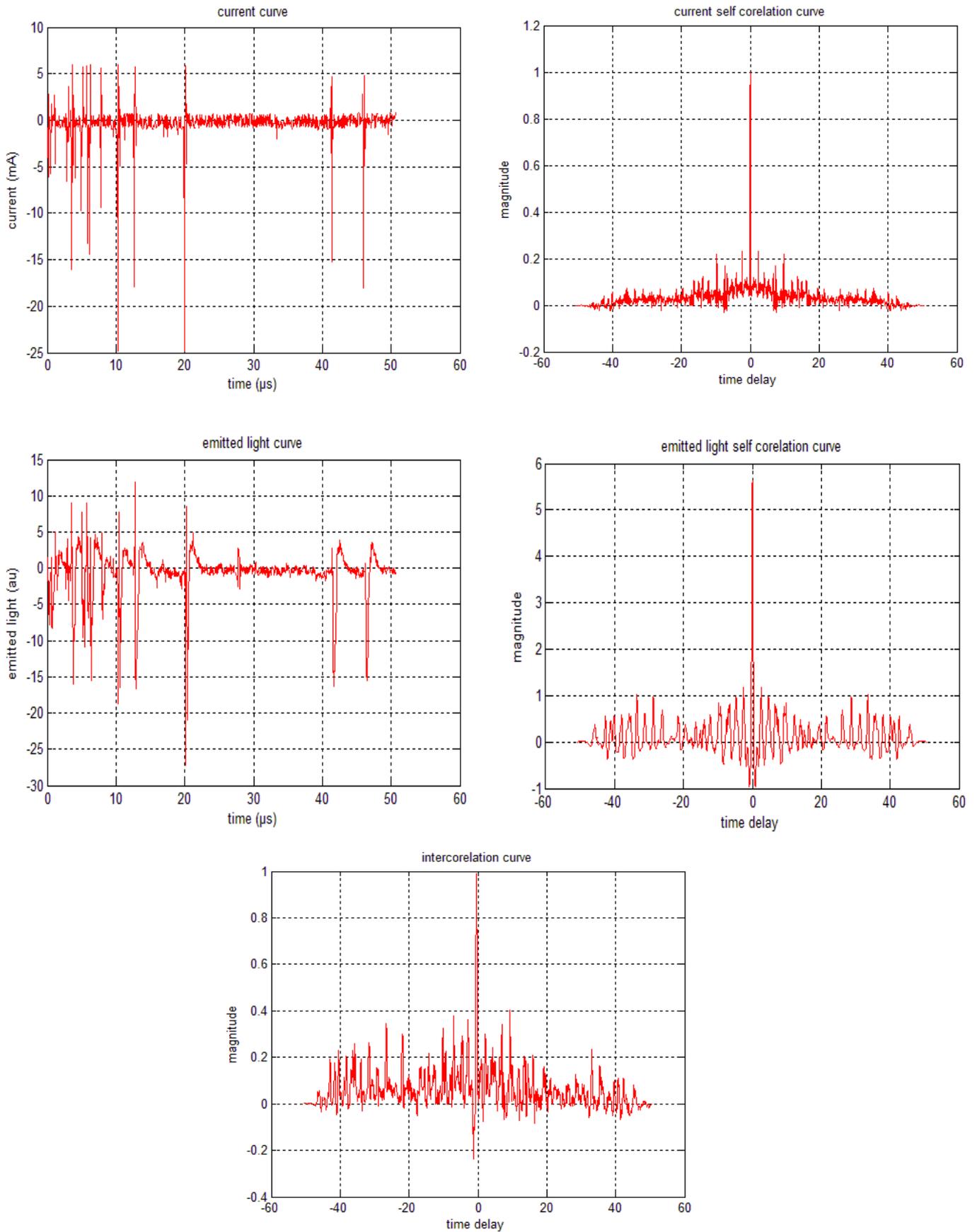


Figure IV.6. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « A » avec les auto et inter corrélations associées en polarité négative

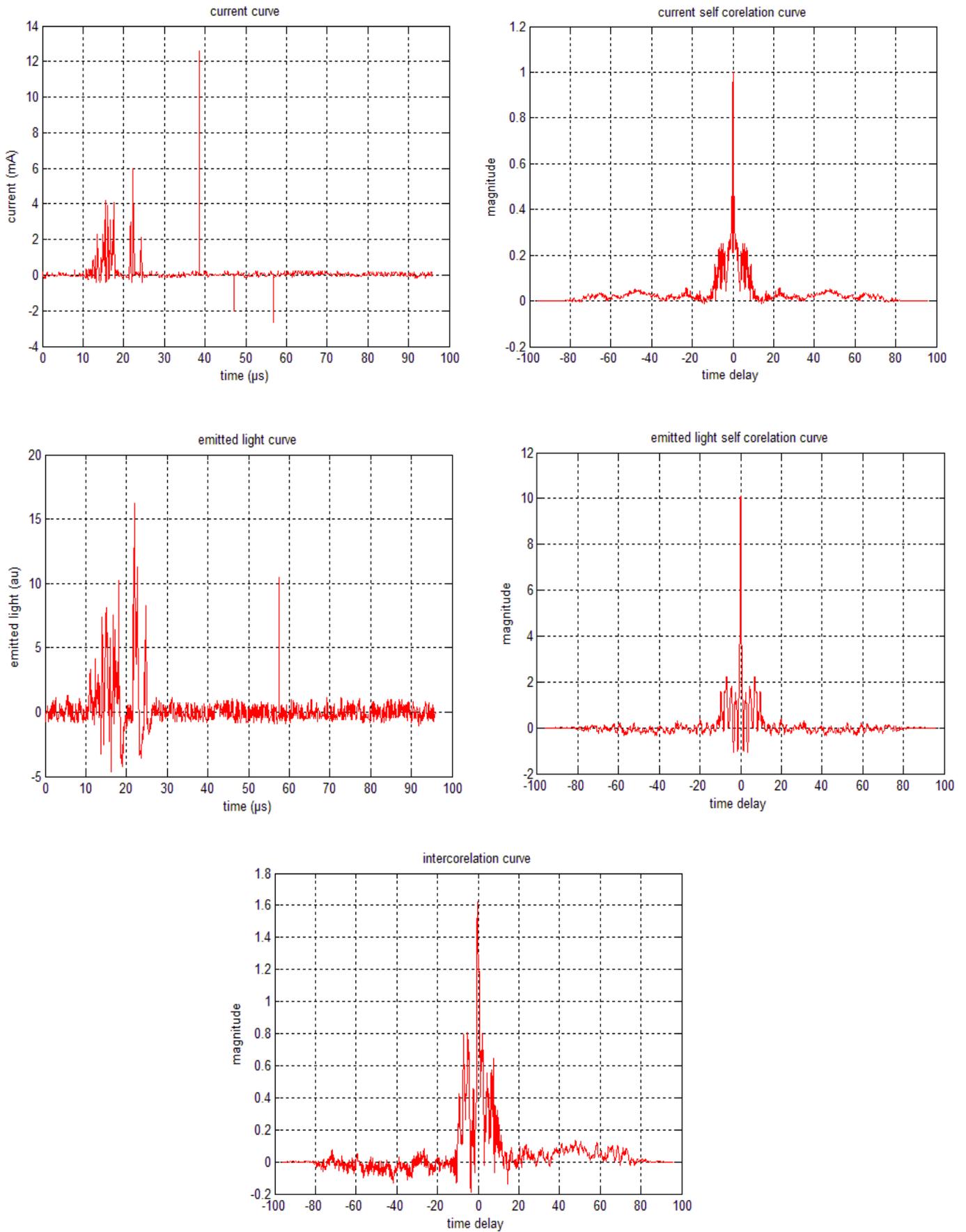


Figure IV.7. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondantes à un streamer de classe « A » avec les auto et inter corrélations associées en polarité positive

IV.3.1.2. Influence de la polarité

L'examen des courbes des figures IV.6 et IV.7 montre que le changement de la polarité de la tension d'amorçage n'affecte pas les caractéristiques des fonctions d'auto-corrélation aussi bien celles relatives aux courbes de courant que celles relatives aux courbes des émissions lumineuses. La même remarque concerne les fonctions d'inter-corrélation courant/ lumière.

IV.3.2.1. Les streamers de classe « B »

Les fonctions d'auto-corrélation correspondantes aux courbes de courants relatives aux streamers de classe (B) sont certes aussi dominées par un pic central, mais, dans ce cas, la différence entre l'amplitude de ce pic et les autres valeurs de la fonction est nettement moins marquée comparativement au cas précédent. L'élargissement constaté sur les courbes qui représentent l'auto-corrélation montre donc que, malgré le caractère aléatoire des signaux de courant, il existe une ressemblance (un tant soit elle petite) de plus en plus forte entre les différentes parties de ces signaux. Cette ressemblance est d'autant plus faible que les parties s'éloignent l'une de l'autre.

Les mêmes remarques peuvent être faites concernant les fonctions d'auto-corrélation liées aux courbes des émissions lumineuses relatives aux mêmes streamers (figure IV.8).

Les fonctions d'inter-corrélation courant/lumière pour cette classe de décharges partielles sont caractérisées par la même diminution de l'écart entre la valeur au centre et les autres valeurs. En plus, nous constatons une dissymétrie frappante (autour du pic central) sur les courbes qui représentent ces fonctions. Ceci s'explique par la forme des courbes des émissions lumineuses dont les valeurs s'éloignent du zéro par une composante continue qui apparaît sur un intervalle de temps relativement large avant l'extinction du streamer mais qui est absente au début de ce dernier.

IV.3.2.2. Influence de la polarité

Les mêmes remarques précédentes sont faites aussi pour les courbes de courant et d'émissions lumineuses enregistrées pour les pré-claquages de classe (B) en polarité positive (figure IV.9).

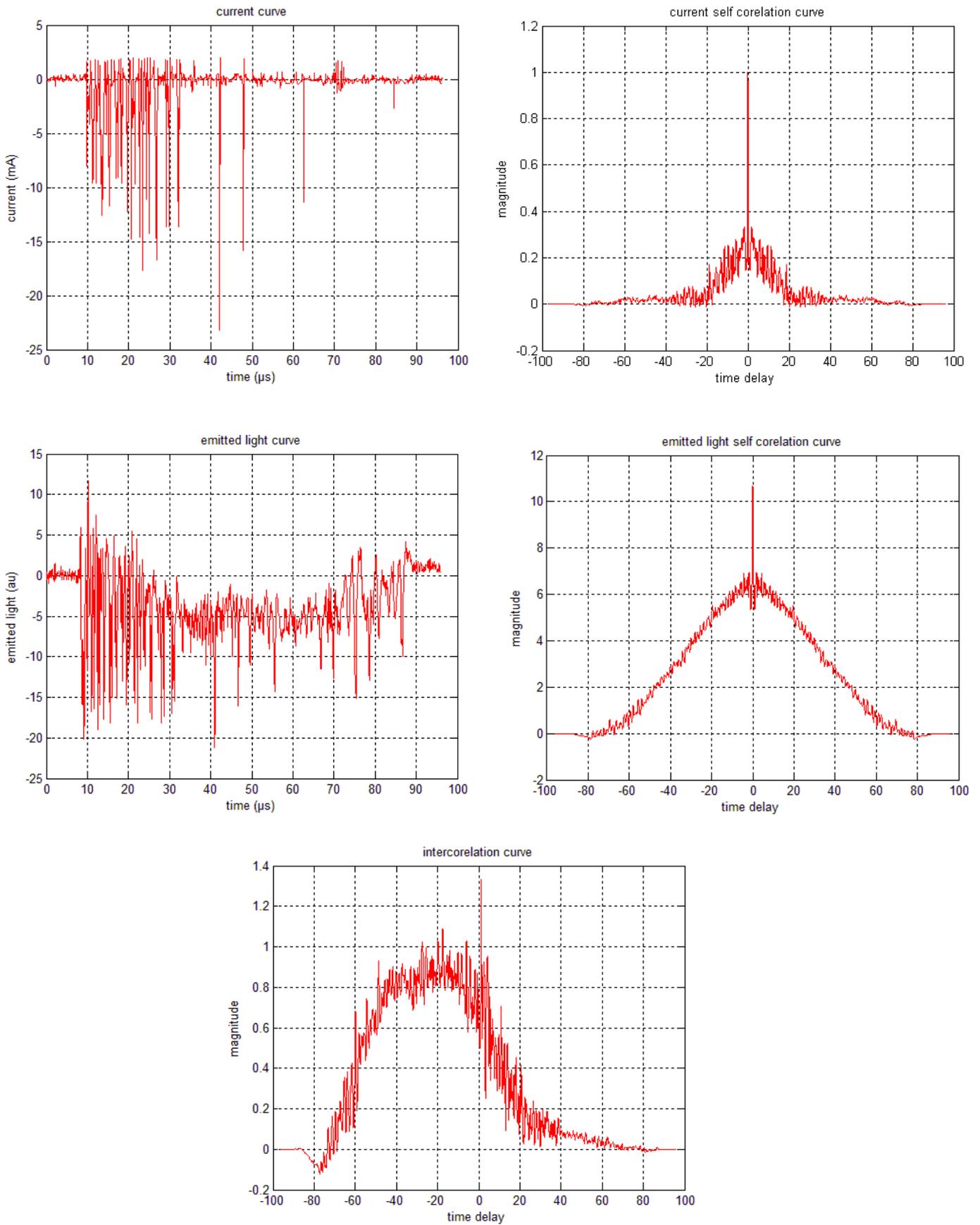


Figure IV.8. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « B » avec les auto et inter corrélations associées en polarité négative

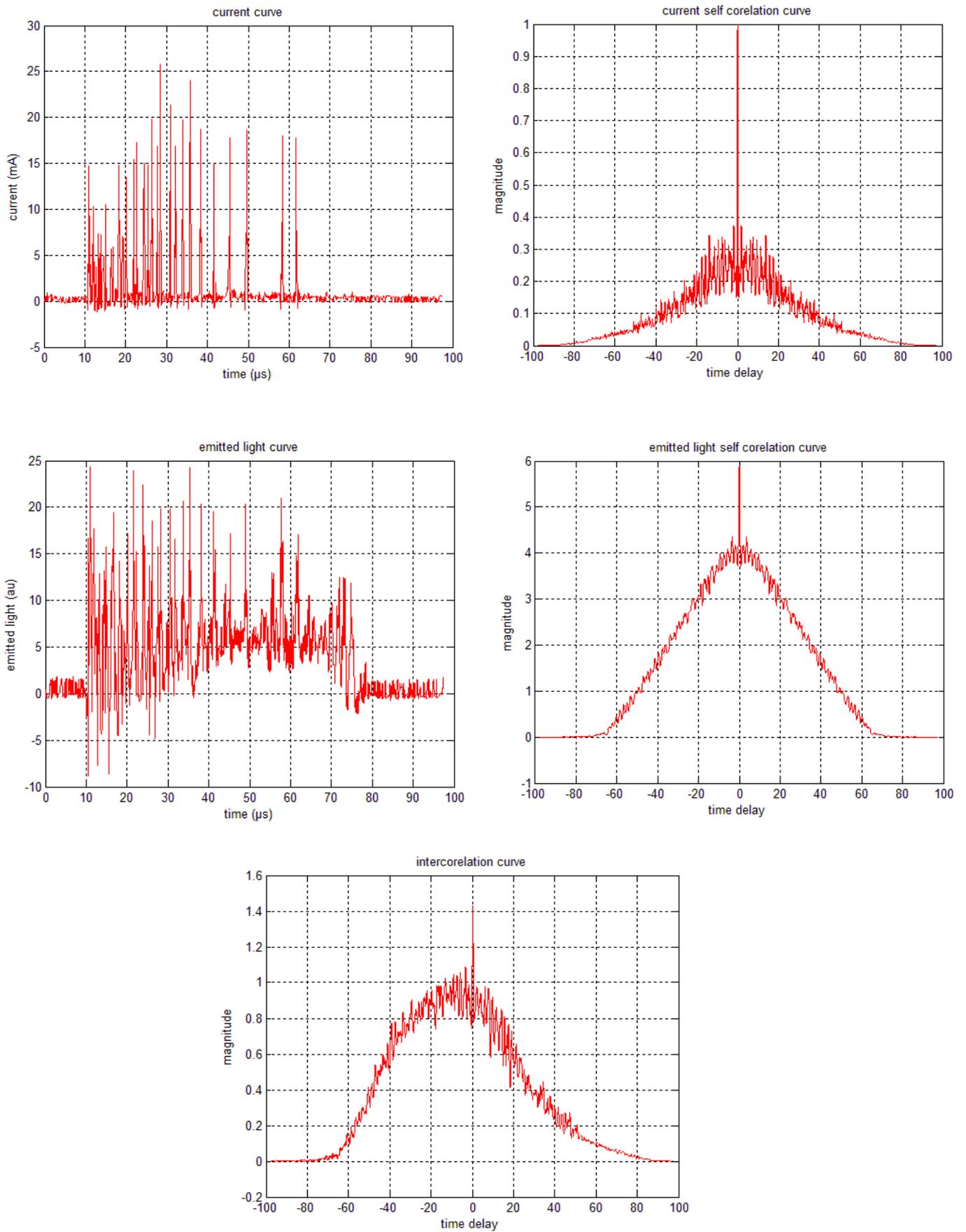


Figure IV.9. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « B » avec les auto et inter corrélations associées en polarité positive

IV.3.3.1. Les streamers de classe « C »

Les fonctions d'auto-corrélation relatives aux courbes de courant associées aux streamers de forte puissance, sous polarité positive, ne sont plus caractérisées par le pic central, comme pour les deux cas précédents, mais ont plutôt une forme conique plus ou moins évasée. Cette forme met en évidence l'existence d'une assez forte ressemblance entre les parties mitoyennes d'une même courbe (correspondant à de petits décalages temporels). Cette ressemblance tend bien sûr à rapidement s'atrophier lorsque le décalage temporel augmente. Ceci peut s'expliquer par la faible amplitude des pics qui entourent la composante continue dans les courbes de courants.

Cette forme particulière de la fonction d'auto-corrélation ouvre peut être la possibilité d'une prédiction préalable de l'apparition d'un arc même si la rapidité du streamer laisse très peu de temps d'action pour éviter son occurrence.

Cette même forme conique est retrouvée non seulement sur les graphes des fonctions d'auto-corrélation correspondantes aux signaux des émissions lumineuses, mais aussi sur ceux représentant les fonctions d'inter-corrélation courant/lumière associés aux streamers de classe (C). La ressemblance citée plus haut existe donc non seulement entre des parties mitoyennes d'une même courbe (de courant ou d'émissions lumineuses), mais aussi entre deux parties (l'une prise de la courbe de courant et l'autre de la courbe de lumière associées au même événement) légèrement décalées dans le temps (figure IV.11).

IV.3.3.2. Influence de la polarité

En polarité négative la qualité des enregistrements figure (IV.5.b) nous a empêchés de réaliser la même analyse précédente. Mais du moins le calcul de la fonction d'auto-corrélation correspondant à la courbe de courant nous a permis de constater que cette fonction est dominée (comme pour les streamers de classe (A)) par un pic central de très forte amplitude et des valeurs quasiment nulles ailleurs (Figure IV.10).

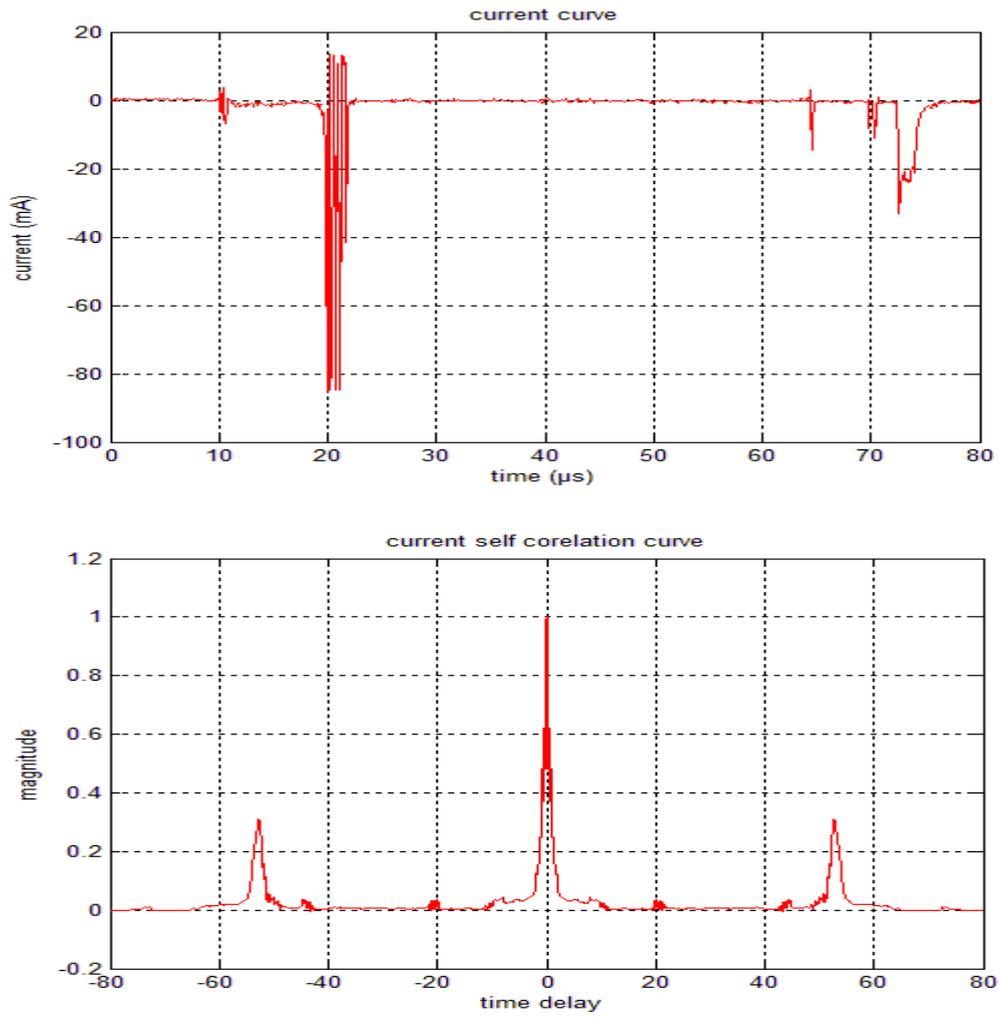


Figure IV.10. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « C » avec l'auto-corrélation associée en polarité négative

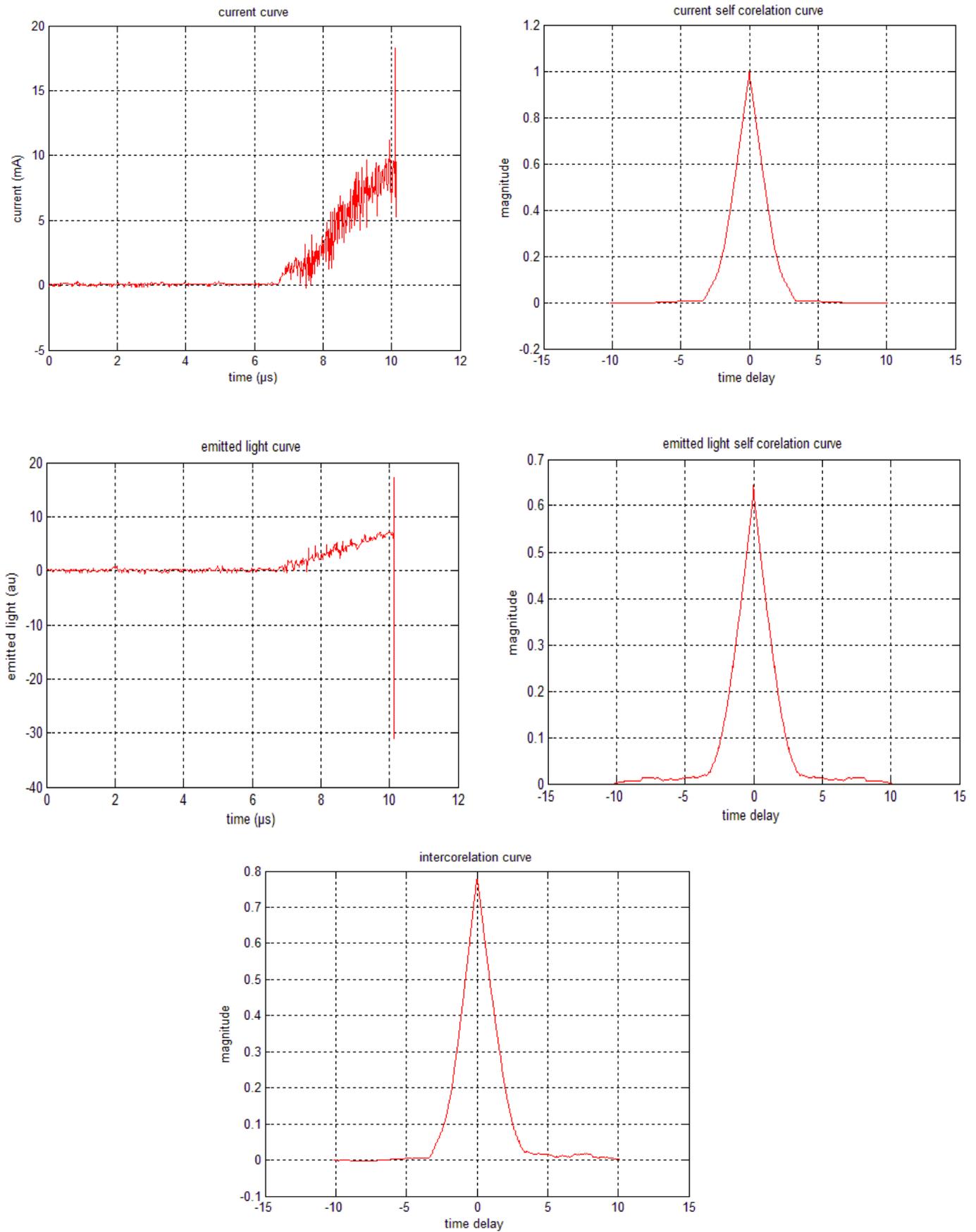


Figure IV.11. Courbes de courant et d'émission lumineuse correspondant à un streamer de classe « C » avec les auto et inter corrélations associées en polarité positive

IV.4. Analyse du modèle électrique de Fofana et Beroual

Comme cité précédemment (chapitre (II)), Fofana et Beroual ont considéré, pour élaborer leur modèle électrique, que les streamers se propagent par sauts successifs et que chaque saut correspond à la formation d'une branche. Chaque branche est assimilée à un canal cylindrique de rayon (r) et de conductivité (σ) [81], et est représentée par une cellule (RC) (R et C étant respectivement une résistance et une capacité). Le streamer peut être représenté par un circuit électrique équivalent [93] (figure II.17), où (R_0) et (C_0) sont la résistance et la capacité du système sans présence de streamer. La résistance (R_0) de l'électrode de terre est estimée à 100Ω [87].

A l'amorçage du streamer, le premier pas de ce dernier correspond à l'apparition de la première impulsion de courant dont l'amplitude peut être calculée en utilisant le circuit électrique équivalent constitué de la cellule (R_0C_0) seule. L'équation régissant ce circuit est la suivante.

$$U = R_0I(t) + (1/C_0) \int I(t)dt$$

La résolution de cette équation, en supposant bien sûr que le condensateur (C_0) est initialement déchargé, aboutit à l'expression suivante du courant qui traverse la cellule.

$$I(t) = (U/R_0) \exp(-t/\tau_0)$$

Où $\tau_0 = R_0C_0$: est la constante de temps de la cellule

U : est la tension d'alimentation

I : est le courant

A l'instant ($t=0$), ce courant vaut donc (U/R_0). Il est alors clair que si la valeur de (R_0) est prise égale à (100Ω) conformément à ce modèle, l'amplitude de l'impulsion de courant dépasserait forcément ($100A$) pour des tensions qui dépassent les ($10kV$) (ce qui est généralement le cas dans les systèmes de haute tension étudiés). Ceci n'est bien sûr pas observé sur les courbes de courant enregistrées lors des décharges partielles. Une valeur plus appropriée de la résistance (R_0) doit impérativement être considérée pour améliorer le modèle et le rendre représentatif. En nous référant justement à nos enregistrements nous avons remarqué que cette résistance doit valoir au minimum ($50M\Omega$) pour que les courants retrouvés par simulation du modèle se rapprochent de ceux enregistrés.

Cette valeur de (R_0) ne peut en aucun cas représenter la résistance du plan de masse et de l'électrode terre, mais elle doit obligatoirement comporter une autre interprétation. Comme cité en introduction du chapitre II, un grand nombre d'auteurs sont d'accord que l'avènement d'une décharge partielle est précédé (en première étape) par l'apparition d'une perturbation (de

quelques μm de diamètre) caractérisée par un indice de réfraction différent de celui du liquide environnant, au voisinage de l'électrode acérée. Beaucoup de chercheurs affirment que cette perturbation est de nature gazeuse, et que la propagation du streamer (qui apparaît en deuxième étape) se fait à l'intérieur de cette perturbation appelée phase gazeuse. Ceci nous a poussés à penser que l'interprétation la plus plausible de la valeur de (R_0) est que cette dernière représente la résistance d'un cylindre (de diamètre égal à celui du streamer) de cette phase gazeuse à l'intérieur duquel se formera le premier petit segment de streamer. (La considération d'un segment identique de liquide donnerait une valeur de résistance beaucoup plus grande vu que la résistivité des huiles utilisées est de l'ordre de $10^{12}\Omega\text{m}$).

La capacité (C_0) de la première cellule du modèle est donnée selon les auteurs par l'expression suivante [87].

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r[(D+R_p) R_p/D]$$

Où D : est la distance inter-électrode

R_p : est le rayon de l'électrode pointe

ϵ_0 : est la permittivité du vide ($8.85 \cdot 10^{-12}$)

La permittivité relative (ϵ_r) valant 2.2 pour la plupart des huiles utilisées. Le calcul de (C_0) donne environ une valeur de ($6 \cdot 10^{-16}\text{F}$) lorsque ($D=10 \text{ mm}$) et ($R_p=5 \mu\text{m}$). La constante de temps (τ_0) de cette cellule vaudra donc approximativement (30 ns). Or l'examen soigneux des courbes pratiques de courant nous a permis de constater qu'elles sont constituées d'impulsions dont la durée est de l'ordre de (100ns). Cette valeur (qui vaut environ $3\tau_0$) est donc suffisante pour que le condensateur (C_0) soit considéré comme étant approximativement complètement chargé à la fin de la première impulsion de courant. Ceci veut dire qu'à cet instant la tension aux bornes de (C_0) est égale à la tension d'alimentation (U). Cette dernière est donc à présent appliquée à la partie du mélange (gaz huile) de l'espace inter-électrode non encore occupée par le streamer (située entre la tête du streamer et le plan de masse).

De la même manière que précédemment, l'apparition d'une deuxième impulsion de courant doit correspondre à un deuxième saut du streamer. Ce dernier doit, conformément au modèle, être représenté par une deuxième cellule (R_1C_1) qui s'ajoutera en cascade à la première. Mais n'oublions pas que le condensateur (C_0) est déjà complètement chargé, et que la nouvelle cellule est soumise donc à la tension (U). La cellule (R_0C_0) n'a par conséquent plus aucun rôle à jouer dans le calcul de la nouvelle impulsion de courant.

A notre avis le modèle se limitera maintenant à la seule cellule (R_1C_1) , dans lequel (R_1) représente encore une fois la résistance du cylindre de la phase gazeuse (précédemment décrit)

qui est écourté de la partie déjà envahie par le streamer durant le premier saut. La deuxième impulsion de courant (qui accompagnera le deuxième saut du streamer) aura comme expression la suivante, en considérant encore une fois le condensateur (C_1) initialement déchargé.

$$I(t) = (U/R_1) \exp(-(t-T_0)/\tau_1)$$

Où $\tau_1=R_1C_1$ est la constante de temps de la cellule

T_0 : est la durée de la première impulsion

Comme il est possible de le vérifier dans la section suivante où sont montrés les résultats des simulations, le condensateur (C_1) aura, à l'image de (C_0), le temps, durant la deuxième impulsion, d'être pratiquement entièrement chargé vu que ($\tau_1 < T_1/3$). Cette même condition, déjà vérifiée pour les deux premières impulsions de courant le sera aussi pour les autres durant toute la propagation du streamer. Ce qui nous permettra de supposer (sans grande erreur) que la tension reste constante tout au long de ce dernier. Ou en d'autres termes que le streamer est équipotentiel. (Nous considérons que les streamers sont des milieux infiniment conducteurs comparativement aux huiles ou même aux phases gazeuses qui s'y forment juste avant un pré-claquage).

Finalement le modèle que nous adopterons, pour représenter la propagation d'un streamer filamentaire, sera formé d'une succession de cellules (RC) (où chacune remplace la précédente) dont les éléments changent de valeur à chaque saut du streamer. Ces cellules représentent donc chacune un saut du streamer et non un segment de ce dernier.

IV.5. Simulation du modèle adopté

D'abord, nous devons souligner que nos simulations ne concernent que les streamers de classe (C) (c.à.d. ceux qui mènent à un arc) étant donné que les simulations des streamers des autres catégories nécessitent la considération des phénomènes électro-hydrodynamiques (non encore parfaitement maîtrisés) qui interviennent durant l'extinction de ces derniers. Même si la polarité de la tension d'alimentation n'influe pas sur la structure du circuit électrique modélisant le streamer, elle aura quand même un effet, aussi bien sur les valeurs, que sur le mode de variation des éléments qui constituent ce modèle. Il est à noter néanmoins que l'explication précédemment donnée pour l'élément résistif est valable pour les deux polarités.

IV.5.1. Streamers positifs

En assimilant le streamer positif à un filament conducteur, nous avons adopté l'expression suivante [85] pour la variation de la capacité du système pendant la propagation.

$$C(i) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r R_p / \ln[D/(l(i) + R_p)]$$

Où $C(i)$: capacité de l'étape (i)

$l(i)$: longueur du streamer à l'étape (i)

f : coefficient correcteur de l'approximation

Alors que pour l'élément résistif l'expression adoptée doit répondre à l'explication donnée précédemment, qui lui permettra donc d'avoir une variation décroissante lorsque la longueur du streamer augmente tout en étant inspirée de l'expression donnée par les auteurs dans [87].

$$R(i) = K_r [D - l(i)]$$

Où (K_r) est un coefficient de proportionnalité qui doit avoir la même dimension que (ρ/S), mais où (ρ) est la résistivité de la phase gazeuse et (S) la section du cylindre de cette même phase où se propagera le streamer.

La même analyse effectuée précédemment pour les courbes expérimentales de courant à savoir le calcul de l'énergie, de la puissance, de l'auto-corrélation et de la FFT, a été refaite pour celle obtenue par simulation. Les résultats sont montrés sur la figure (IV.12a). La courbe de courant de cette figure montre une variation en exponentielle d'une composante continue entourée de pics de faible amplitude. Cette variation est très semblable à celle de la courbe expérimentale de la figure (IV.12b). Cette même remarque concerne les courbes de variation de l'énergie et de la puissance. Malgré l'apparition d'harmoniques de très faibles amplitudes l'analyse fréquentielle de la courbe de courant obtenue par simulation aboutit pratiquement aux mêmes conclusions retrouvées lors de l'analyse des courbes pratiques. Quand à la fonction d'auto-corrélation, calculée pour la courbe de courant obtenue par simulation, elle présente une forme conique légèrement plus évasée que celle de la même fonction calculée pour les courbes enregistrées pratiquement. Ceci veut dire qu'il ya légèrement plus de ressemblance entre les parties moyennes d'une courbe simulée qu'entre les parties moyennes d'une courbe pratique.

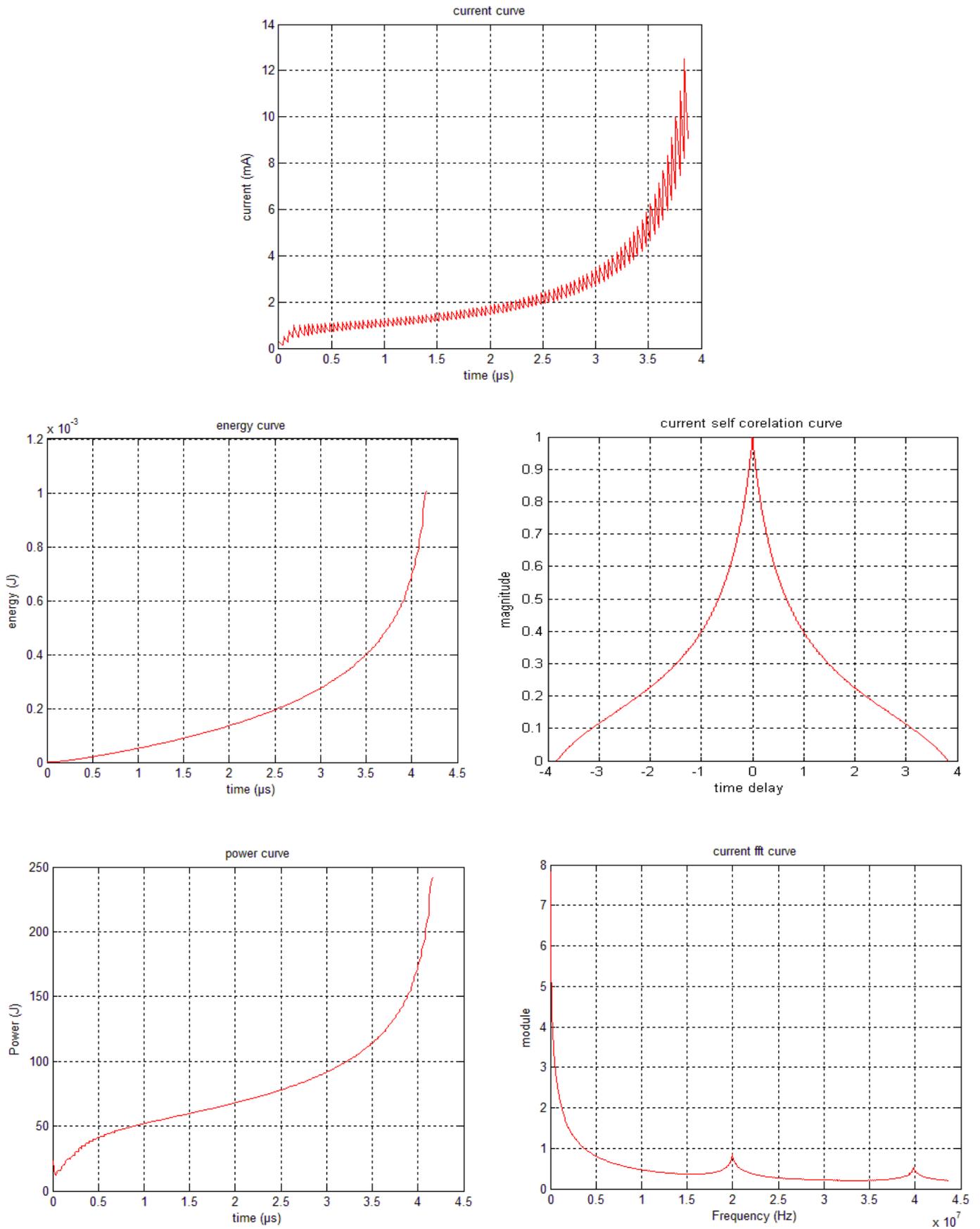


Figure IV.12.a. Courbes de courant, d'énergie, de puissance, d'auto-corrélation et de la FFT correspondants à la simulation d'un streamer positif

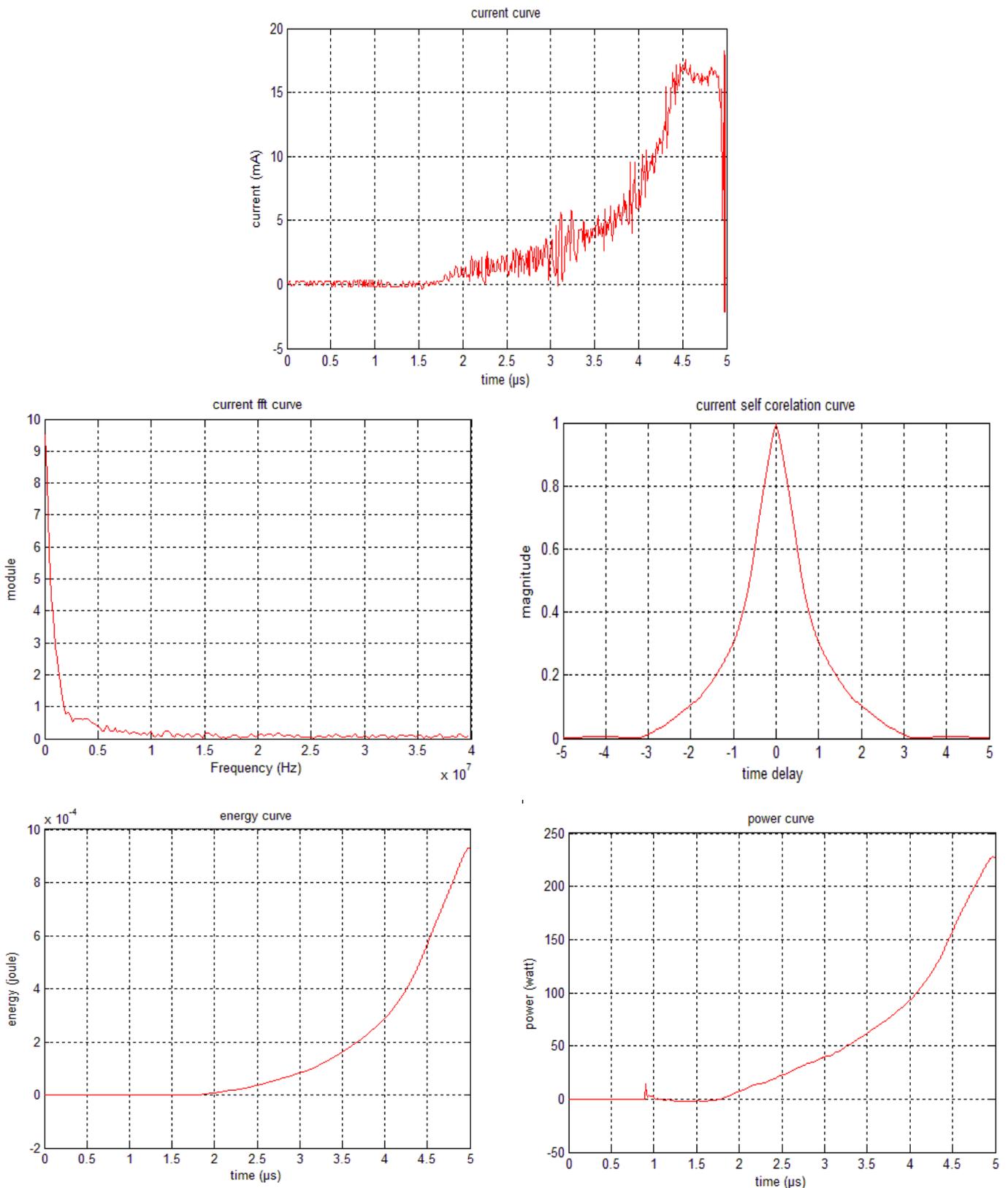


Figure IV.12.b. Courbes pratiques de courant, d'énergie, de puissance, d'auto-corrélation et de la FFT correspondants à un streamer positif de classe (C)

La courbe de courant de la figure (IV.11), enregistrée elle aussi pour un streamer de classe (C), a une composante continue qui croit suivant une allure quasi linéaire. Dans le souci d'obtenir la même allure par simulation, nous avons essayé de modifier les expressions des éléments du modèle. Sachant que l'amplitude de chaque impulsion de courant est déterminée par la valeur de

la résistance indépendamment de celle du condensateur, nous avons gardé la même expression donnant la capacité et adopté pour la résistance une loi de diminution modifiée qui doit garantir la linéarité du coefficient (1/R). Ceci nous a permis d'obtenir les courbes de la figure IV.13.b.

$$R(i) = R_0 / [1 + K I(i)]$$

Où K : est un coefficient de proportionnalité

Ceci nous a permis d'obtenir les courbes de la figure IV.13.b.

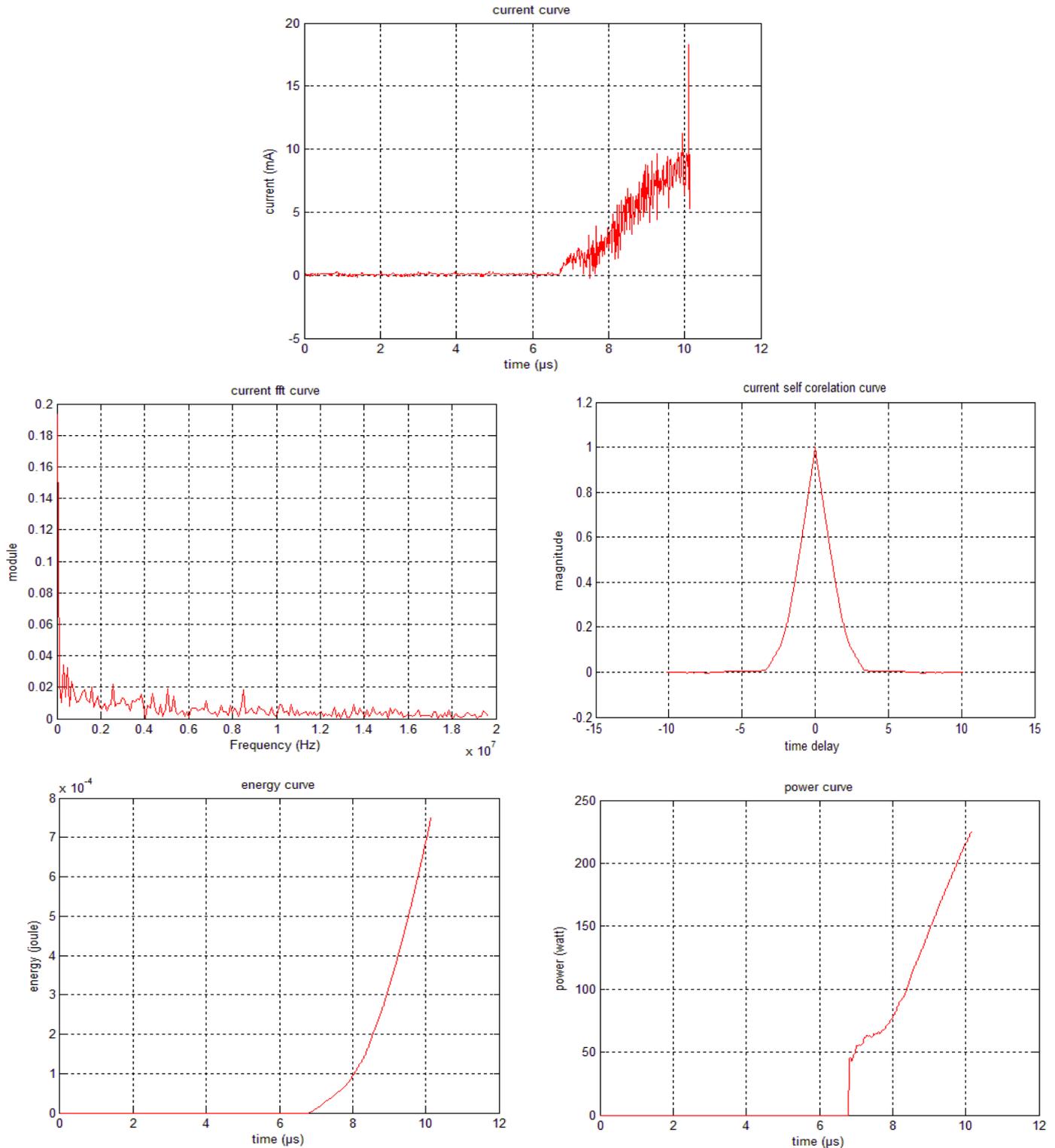


Figure IV.13.a. Courbes pratiques de courant, d'énergie, de puissance, d'auto-corrélation et de la FFT correspondant à un streamer positif de classe (C)

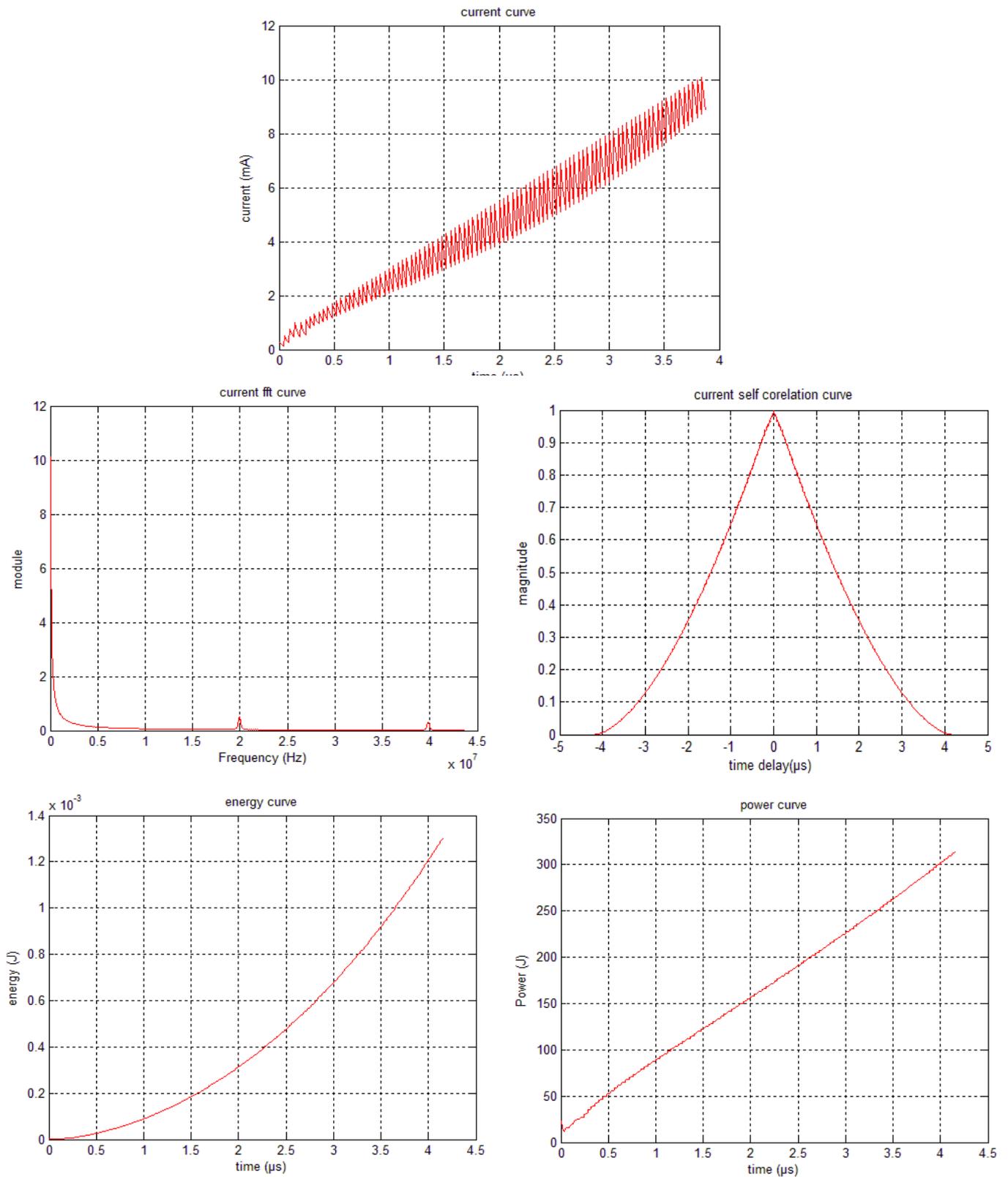


Figure IV.13.b. Courbes de courant, d'énergie, de puissance, d'auto-corrélation et de la FFT correspondant à la simulation d'un streamer positif

Sur la figure précédente nous remarquons en effet que la croissance linéaire de la composante continue du courant a été retrouvée, tout en gardant pratiquement les mêmes allures de variation pour les autres paramètres étudiés. Mais notons en plus que la fonction d'auto-corrélation a quand à elle retrouvé une forme conique.

De façon générale, la simulation du modèle adopté a permis de retrouver des résultats très satisfaisants et très similaires à ceux trouvés pour les courbes enregistrées pratiquement associées aux streamers positifs de classe (C).

IV.5.2. Streamers négatifs

Afin de modéliser les streamer négatifs nous avons opté pour une autre expression de la capacité du modèle qui est aussi proposée par Fofana et Beroual dans [87].

$$C(i) = 2\pi k \epsilon_0 \epsilon_r \alpha [1 + (R_p / (D - l(i)))]$$

Où k : coefficient correcteur

α : coefficient dépendant de la taille du plan de masse

Ce choix nous a permis d'obtenir après simulation une courbe de courant constituée d'impulsions brèves et rapides suivies toutes d'un retour à zéro. Ceci est en effet très ressemblant aux courbes pratiques enregistrées pour les streamers négatifs sauf que les impulsions sur ces dernières sont aléatoirement espacées, alors que sur les courbes de simulation cet espacement est parfaitement régulier. Aussi l'amplitude des pics croît de façon exponentielle. Les résultats sont montrés sur la figure IV.14.

L'énergie comme la puissance ont une variation par paliers d'allure générale en exponentielle. L'analyse fréquentielle a donné un spectre assez particulier qui contient, en plus d'une composante continue (qui a le sens de valeur moyenne seulement), une fondamentale suivie d'harmoniques d'amplitudes conséquentes et quasiment identiques. Ceci peut s'expliquer par le caractère pseudopériodique de la courbe de courant relative au modèle, contrairement au caractère aléatoire des courbes pratiques. La fonction d'auto-corrélation relative à la courbe de courant montre dans ce cas une forme dominée par un pic central d'amplitude incomparablement plus grande que n'importe quelle autre valeur prise par cette fonction.

De la même manière que pour les streamers positifs, nous avons simulé à nouveau le modèle en adoptant une variation en $[1/l(i)]$ de l'élément résistif, ce qui a abouti aux courbes de la figure (IV.15). Les résultats trouvés sont alors quelque peu différents sauf pour l'énergie qui garde sa variation exponentielle par paliers. Celle de la puissance est certes par paliers aussi, mais son allure globale est linéaire. La fonction d'auto-corrélation a retrouvé une forme conique assez évasée alors que le spectre fréquentiel contient encore une fois une fondamentale suivie d'harmoniques dont les amplitudes diminuent avec l'ordre.

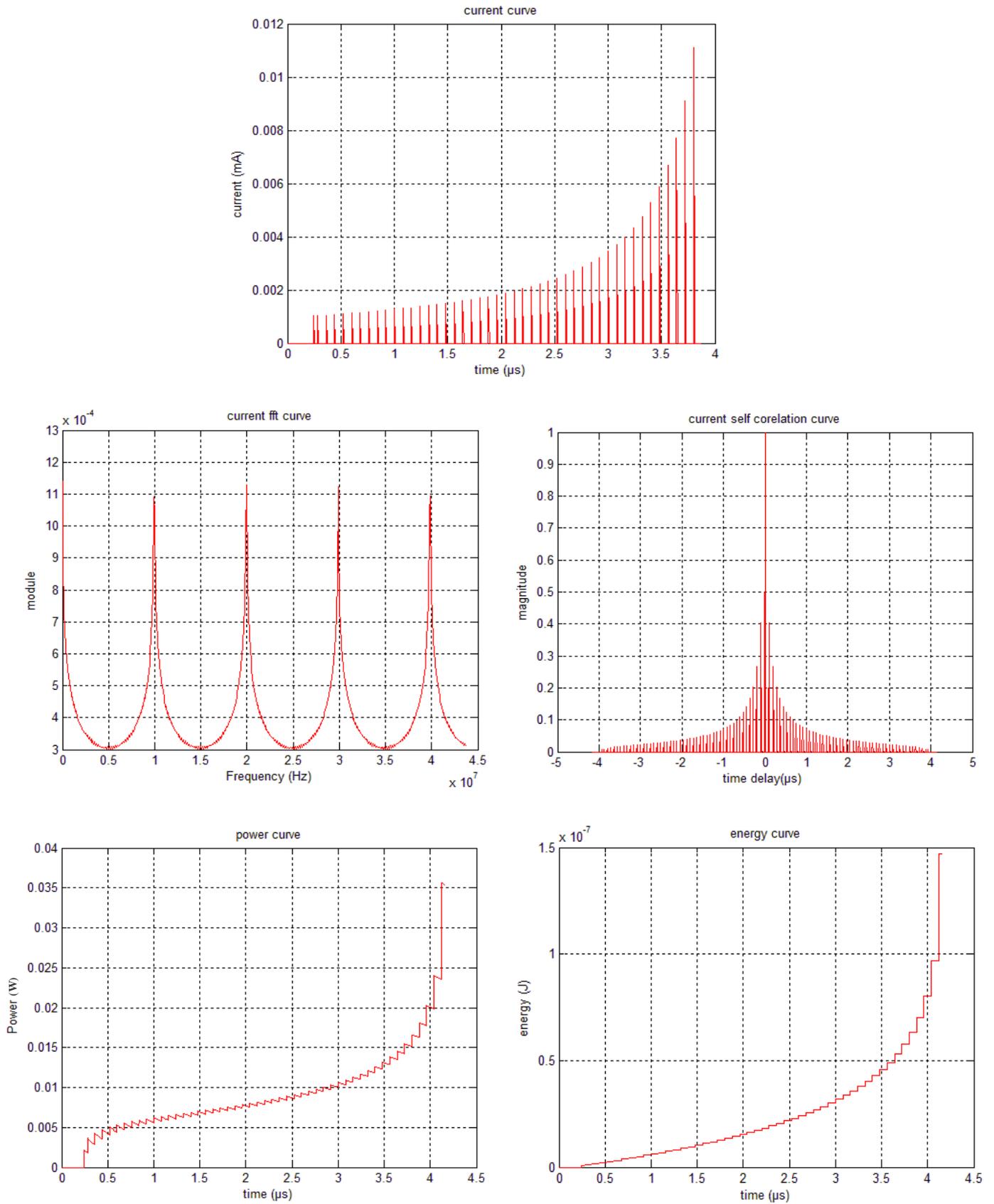


Figure IV.14. Courbes de courant, d'énergie, de puissance, d'auto-corrélation et de la FFT correspondant à la simulation d'un streamer négatif

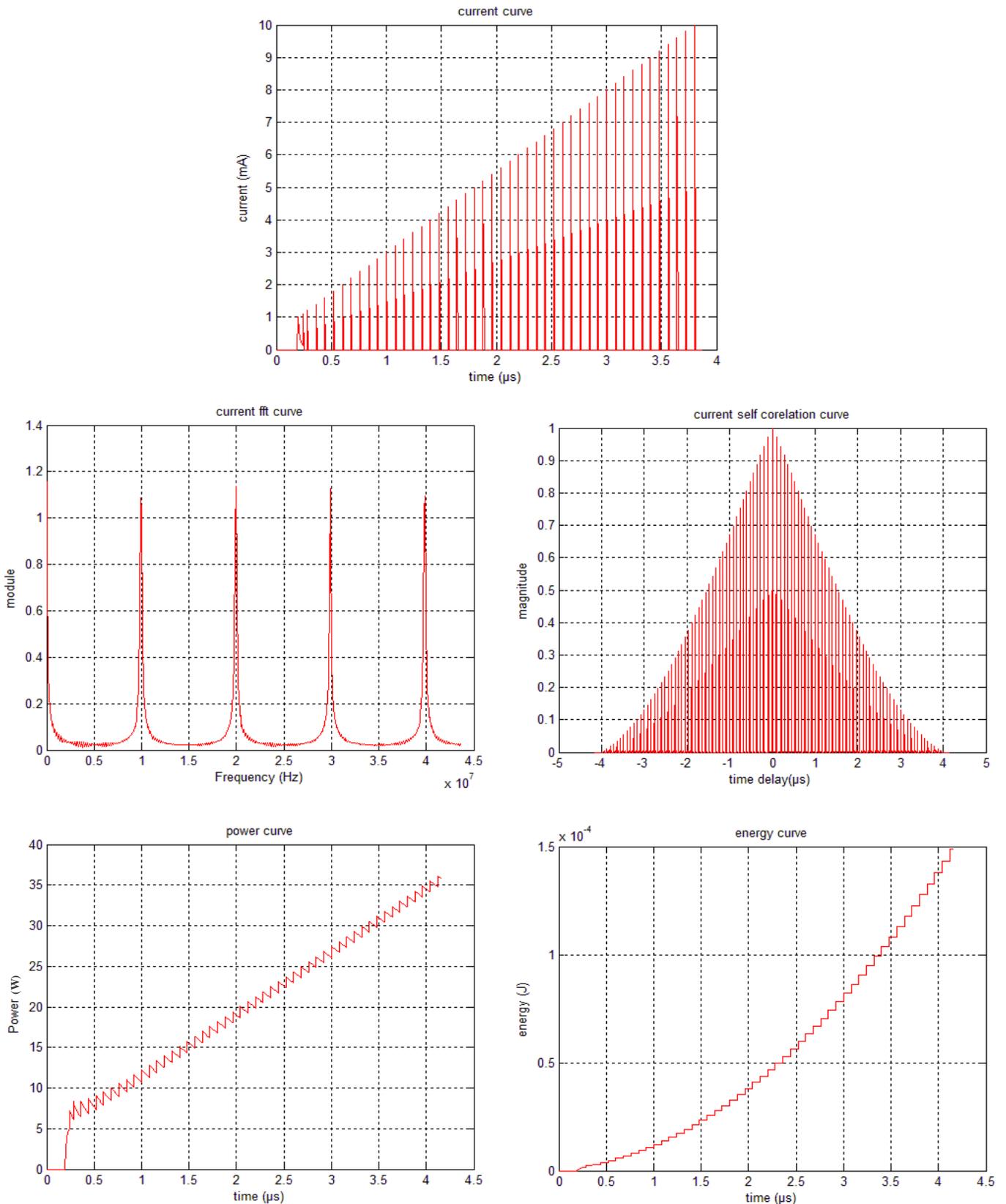


Figure IV.15. Courbes de courant, d'énergie, de puissance, d'auto-corrélation et de la FFT correspondant à la simulation d'un streamer négatif

Comme nous l'avons déjà dit précédemment la comparaison entre deux signaux (surtout lorsqu'ils sont de forme très complexe) ne peut être faite en nous appuyant uniquement sur la simple constatation de leur ressemblance. Il est plutôt préférable de quantifier cette dernière en

passant par le calcul de la fonction d'inter-corrélation relative aux deux signaux. Nous avons donc fait le calcul de cette fonction pour les signaux de courant simulé et pratique. La figure (IV.16) montre, en plus de cette dernière, la fonction d'auto-corrélation relative à la courbe pratique de courant. Il est facile de constater que mis à part la différence d'amplitude les deux fonctions sont pratiquement identiques, ce qui traduit mathématiquement la validité de notre modèle. Pour de meilleurs résultats, il faudra peut être soit choisir d'autres expressions pour les éléments du modèle soit carrément changer ou améliorer ce dernier.

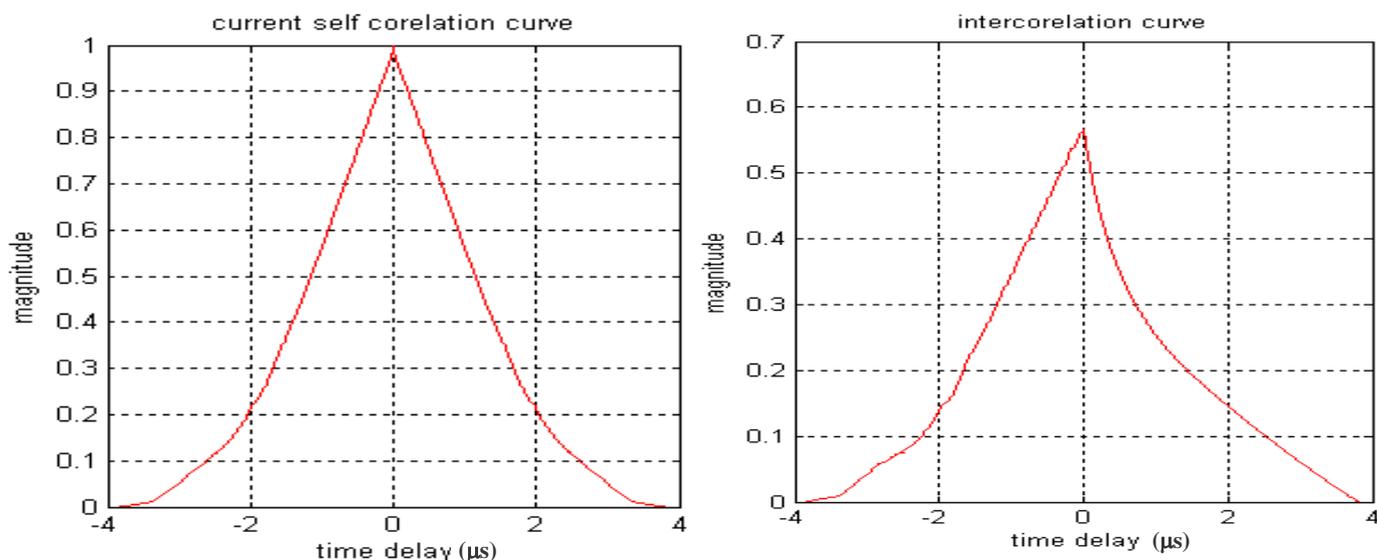


Figure IV.16. Fonction d'auto-corrélation relative à une courbe pratique de courant et celle d'inter-corrélation entre cette dernière et la courbe simulée

IV.6. Conclusion

L'analyse fréquentielle a montré que les courbes de courants possèdent des spectres de largeur inversement proportionnelle à la puissance du streamer. En classe « A » ces spectres ont l'allure de celui d'un filtre passe bas de fréquence de coupure qui tourne autour de 10MHz. Alors que pour les classes « B » et « C » les spectres se rétrécissent progressivement et sont dominés par leurs composantes continues d'amplitude de plus en plus forte comparativement à celles des autres fréquences. Cette composante ne correspond à l'existence d'un passage continu de courant durant la propagation des streamers que dans le seul cas de ceux de la classe « C » en polarité positive. Pour les deux autres classes, elle ne porte que le sens purement mathématique de valeur moyenne. Le rétrécissement de la bande passante peut être dû à l'augmentation de la vitesse des streamers qui ne laisse plus le temps à certains phénomènes physicochimiques (accompagnants les pré-claquages et caractérisés par les hautes fréquences) de se produire.

Il a été constaté que la polarité de la tension d'alimentation n'a que très peu d'effet sur la contenance fréquentielle des courbes aussi bien de courant que des émissions lumineuses associées à la plupart des streamers, sauf dans le cas de ceux de la classe (A) pour lesquels les spectres des courbes de courant en polarité négative ont l'allure de celui de filtre passe bas, ce qui n'est pas le cas en polarité positive.

Notons que le but initial de l'analyse fréquentielle était de découvrir des fréquences particulières contenues dans les spectres des différentes courbes enregistrées, ce qui aurait permis de faire une reconnaissance des streamers par leur empreinte fréquentielle et/ou de faire une caractérisation fréquentielle de chaque classe. Malheureusement, les spectres trouvés n'ont révélé aucune information utilisable dans ce sens.

Grace au calcul de la fonction d'auto-corrélation associée à chaque courbe enregistrée, nous avons mis en évidence le caractère aléatoire des courbes de courant et celle des émissions lumineuses. La dominance d'un pic central dans la plupart des fonctions d'auto-corrélation calculées prouve l'absence de ressemblance entre les différentes parties d'une même courbe, et par conséquent l'impossibilité de toute tentative de prédiction des valeurs futures. Cependant une exception peut, peu être, se faire concernant les streamers les plus puissants de classe (C) pour lesquels la fonction d'auto-corrélation prend une forme conique. Ce qui prouve l'apparition d'une certaine ressemblance entre les parties moyennes de la même courbe. Ceci ouvre la voie vers la prédiction éventuelle de l'arc qui suit ce type de streamer. De la même manière, la fonction d'inter-corrélation nous a permis de tirer les mêmes conclusions concernant la ressemblance entre les courbes de courant et celles des émissions lumineuses. Ceci prouve que pour un diagnostic complet des phénomènes de décharges partielles, il faut considérer les deux en même temps et ne pas se contenter d'une seule. Chacune doit apporter des informations non contenues dans l'autre.

D'autre part, dans ce chapitre nous avons présenté le circuit électrique équivalent que nous avons adopté pour modéliser la propagation des streamers devant aboutir à des arcs. Ce modèle a été inspiré de celui établi par Fofana et Beroual [87] sur lequel nous avons effectué des modifications dictées par les critiques objectives que nous avons soulevées. Par exemple, l'élément résistif (contenu dans le modèle) ne peut, d'après nous, représenter la résistance d'un segment du streamer beaucoup trop conducteur pour donner des impulsions d'amplitudes acceptables. Par opposition à cela, nous avons proposé que cet élément représente la résistance du cylindre de la phase gazeuse à l'intérieur duquel doit se propager le streamer. La longueur de ce cylindre étant à chaque itération écourtée d'un pas du streamer. La valeur de l'élément résistif

sera décroissante, et par conséquent l'amplitude des impulsions successives de courant augmentera naturellement pendant la propagation du streamer.

L'adoption de ce point de vue nous a permis de trouver par simulation du modèle une courbe de courant d'allure globale en exponentielle très semblable à la courbe pratique tant en polarité positive que négative. La similarité a aussi été relevée pour la variation de l'énergie et la puissance. Une petite différence est quand même à signaler concernant les spectres de fréquence où apparaissent des harmoniques d'amplitudes plus marquées en polarité négative qu'en polarité positive sur les spectres associés aux courbes du modèle et qui n'existent pas sur ceux correspondant aux courbes pratiques. Ceci est sans doute dû au caractère pseudo périodique des courbes simulées.

Une autre petite différence a été relevée concernant les fonctions d'auto-corrélation correspondant aux courbes de courant (d'allure exponentielle seulement) associées qui sont dominées par un pic central (uniquement pour la polarité négative), contrairement à celles relatives aux courbes pratiques (de même allure) qui sont de forme conique plus ou moins évasée.

La mise en évidence de la validité du modèle que nous avons adopté ne s'est limitée à la simple constatation oculaire de la ressemblance existante entre les courbes enregistrées pratiquement et celle obtenue par simulation, mais elle est passée par le calcul de la fonction d'inter-corrélation associée aux deux courbes.

Il nous a été possible, grâce à un choix judicieux de l'expression déterminant la variation de l'élément résistif du modèle (même si l'interprétation physique de cette expression ne soit pas encore bien établie et reste encore à investir), d'obtenir des courbes de courant de tendance globale linéaire pour les deux polarités très semblables aux courbes pratiques (du moins en polarité positive).

En définitif, la comparaison des résultats des différents traitements réalisés sur les courbes pratiques d'un côté et sur celles qui découlent des simulations du modèle adopté de l'autre nous permet de tirer des conclusions très favorables concernant la validité de ce dernier même si la voie reste, bien sûr, ouverte à d'éventuelles améliorations futures.

Conclusion générale

Ce modeste travail nous a permis en premier lieu, à travers une conséquente étude bibliographique, d'avoir une connaissance assez détaillée sur les huiles diélectriques de façon générale et les huiles minérales en particulier. Les différentes caractéristiques physicochimiques de ces huiles ont été passées en revue au même titre que les nombreuses causes du phénomène de vieillissement qui réduit considérablement la durée de vie des équipements électriques de puissance fonctionnant sous haute tension. Parmi ces dernières nous nous sommes intéressés aux décharges partielles qui se produisent au sein des huiles isolantes utilisées dans les dits systèmes en provoquant une importante accélération du processus de leur vieillissement.

L'étude a porté essentiellement sur les courbes de courant et celles des émissions lumineuses qui caractérisent les décharges partielles et dont l'enregistrement a été effectué en géométrie pointe-plan pour différentes distances inter-électrodes sous plusieurs niveaux de tension continue en polarité positive et négative.

D'abord nous devons noter que l'utilisation des courbes, précédemment citées, associées à des streamers possédant eux-mêmes un caractère complètement stochastique, est assez difficile eu égard à leur nature purement aléatoire et non stationnaire. Toutefois, grâce à l'application de quelques techniques d'analyse, telles que l'intégration, la FFT et le calcul de la corrélation, un grand nombre d'informations a vu le jour.

L'utilisation des courbes de courant pour le calcul des énergies intervenant lors de la génération et la propagation des streamers nous a permis de montrer que le critère énergétique pure n'était pas suffisant pour obtenir une classification fiable des différents événements. Ceci nous a poussés à chercher un nouveau critère qui tienne compte, aussi, du temps que dure chaque pré-claquage, et qui n'est autre que la puissance moyenne. En effet, ce critère exprime la vitesse de transmission de l'énergie et permet une classification fiable des streamers en trois catégories.

Il a été trouvé qu'en polarité négative les courbes de courant, correspondant aux streamers de classe (A) (donc les moins puissants), ont pour la plupart de larges spectres de fréquences semblables à ceux des filtres passe bas avec des fréquences maximales pouvant atteindre les 40MHz et des fréquences de coupure d'environ 10MHz. Alors que sur les spectres des courbes de lumière des mêmes streamers, nous avons constaté une dominance de la composante continue qui traduit une continuelle émission de la lumière durant toute la propagation de ces derniers. En polarité positive, les spectres des courbes de lumière ne sont pas très affectés. Par contre, ceux des courbes de courant deviennent, eux aussi, dominés par leurs composantes continues, sans pour autant que cette dernière ne corresponde à un continu passage de courant.

Toujours pour cette classe de streamers, les courbes d'énergie montrent, pratiquement toutes, une variation irrégulière grossièrement croissante prenant une lente allure logarithmique aboutissant à des valeurs qui ne dépassent généralement pas (1mJ). Ceci est valable sous les deux polarités de la tension appliquée. Les courbes de puissance, quant à elles, ne présentent aucune monotonie de variation, mais commencent plutôt par prendre très rapidement des valeurs assez élevées et passent ensuite par des fluctuations suivies d'une lente décroissance qui aboutira à une très faible valeur finale de l'ordre de (20W) qui servira à la classification du streamer.

Concernant les streamers de classe « B » (dits de moyenne puissance), les courbes de courants comme celles des émissions lumineuses ont des spectres de fréquences moins larges que ceux associés aux courbes enregistrées en classe « A » et qui sont dominés par leurs composantes continues. Cette dernière reflète l'existence effective d'émission lumineuse en permanence durant la propagation des streamers, alors que pour les courbes de courant cette composante continue ne revêt que le sens mathématique de valeur moyenne des différents pics sans qu'elle ne soit associée à aucun réel passage continu du courant. L'effet de la polarité de la tension d'alimentation est peut ressenti sur les spectres fréquentiels des courants et des émissions lumineuses.

Pour cette catégorie de décharges partielles, la variation de l'énergie est beaucoup plus régulière et garde toujours une allure logarithmique (quoiqu'un peu plus rapide que celle trouvée en classe « A ») qui aboutit à une valeur plus élevée en polarité positive qu'en négative. Les variations fluctuantes des puissances (comme en classe « A ») sont aussi retrouvées pour les pré-claquages de classe « B ». C'est justement ces fluctuations qui ont fait que la puissance ne puisse pas constituer un critère de prédiction des arcs.

Les streamers les plus puissants de la classe (C) qui sont généralement suivis par l'apparition d'arcs se caractérisent par des courbes de courants et d'émissions lumineuses d'ascension très rapides et qui durent très peu de temps. Les courbes de courants associés à de tels événements ont des spectres de fréquences marqués par la très forte dominance de la composante continue qui, pour ce cas, correspond au passage ininterrompu de courant, durant toute la durée du streamer, qui croit jusqu'à provoquer le claquage de l'huile. Ce n'est d'ailleurs que pour ce type de streamers, du moins en polarité positive, que les pics qui entourent cette composante continue ne sont jamais suivis de retour à zéro, et que l'énergie comme la puissance prennent des allures en exponentielle. Cette remarque constitue probablement un critère de prédiction des arcs.

Un modèle électrique a été adopté pour simuler la propagation des streamers de classe « C » seulement. Ce modèle a certes été inspiré de celui de Fofana et Beroual, mais de profondes modifications ont été apportées tant sur le plan structure du circuit que sur le plan valeur et interprétation des composants. Notre modèle est constitué d'une seule cellule dont les composants changent de valeur durant la propagation, contrairement à la constitution en plusieurs cellules en cascade. D'autre part, nous considérons que la résistance représente un cylindre de la phase gazeuse et non un segment du streamer.

Aussi, durant la propagation, la valeur de la résistance décroît dans le modèle proposé alors que la mise en cascade de plusieurs cellules augmente la résistance équivalente de la branche série.

Différentes lois de variation de (R) et de (C) ont été adoptées. Les simulations réalisées ont abouti à des courbes de courant très semblables à celles enregistrées pratiquement et ce pour les deux polarités de la tension. Les mêmes techniques précédentes d'analyse ont été appliquées aux courbes de simulation afin de comparer les résultats à ceux obtenus pour les courbes pratiques. Ces comparaisons nous ont permis de conclure favorablement quand à la validité de notre modèle. Ceci nous ouvre cependant la voie à des perspectives futures très utiles aux progrès dans le domaine du diagnostic des systèmes de puissance et qui peuvent être soit des améliorations de notre modèle ou des autres modèles existants soit carrément l'élaboration de nouveaux modèles éventuellement plus complets.

Bibliographie

- [1] N. Berger, “Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale”, Techniques de l’ingénieur, D 2470.
- [2] Dang. V.H.: ‘Étude des phénomènes de pré-claquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces’.thèse de Doctorat N° ECL 2011-05, Ecole Centrale de Lyon, France, 2011.
- [3] A. Beroual, “Notes de cours de Master – Matériaux pour le génie électrique”, École Centrale de Lyon, 2007.
- [4] R. Bartnikas, “Engineering dielectrics”, Vol.3, 1994.
- [5] P. J. Vuarchex, “Caractéristiques des diélectriques liquides”, Techniques de l’ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988.
- [6] C. Perrier and A. Beroual, “Experimental Investigations on Insulating Liquids for Power Transformers: Mineral, Ester, and Silicone Oils”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 6, pp. 6 – 13, November/December 2009.
- [7] D. Cherry, “Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers”, Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, October 29, 2009.
- [8] K. Dumke, H. Borsi and E. Gockenbach, “Experimental investigation on the behaviour of decomposition gases in insulating liquids caused by partial discharge and”, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [9] Ch. PERRIER « Etude des huiles et des mélanges à base d’huile minérale pour transformateurs de puissance recherche d’un mélange optimal » Thèse de doctorat Ecole centrale de Lyon Avril 2005.

- [10] P. J. VUARCHEX, « huiles et liquides isolants », Techniques de l'ingénieur, Volume DAB, Traité D230, Juin 1995.
- [11] B. P. KANG, « Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (USA) 9, September 1965.
- [12] R. HERROU, « Huiles isolantes » Notes Milan CIGRE Comité d'Etudes n°1, septembre 1959.
- [13] M. DUVAL, J. P. CRINE, « Dielectric behavior and stabilisation of insulating oils in EHV current transformers », IEEE Trans. Elec. Insul., Vol EL-20, n°2, April 1985, pp 437-441.
- [14] N. BERGER, « Liquides isolants en électrotechnique –présentation générale » Techniques de l'ingénieur, Traité D2470, Mai 2002, 20p.
- [15] C.MENGUY , « Electricité statique –Principes –Problèmes –Applications » Technique de l'ingénieur Traité D1035, Décembre 1993,25p.
- [16] M. YASUDA, K. GOTO, H. OKUBO, T.ISHII, E. MORI and M. MASUNAGA « Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers » IEEE Transaction on Power apparatus & systemes, Vol, 101 n° 11 November 1982 pp 4272-4280.
- [17] L.PEYRAQUE « Etude des phénomènes d'électrisation statique dans les transformateurs de puissance à débit d'huile forcé » Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon France, 1995.
- [18] Norme iso 3104 « produits pétroliers –liquides opaques et transparents détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique » octobre 1994.
- [19] « Transformer oil handbook », Copyright Nynas Naphtenics AB, Sweeden, 2004.
- [20] G. Dallemagne « Fluides hydrauliques - facteur d'influence » Technique de l'ingénieur ,Traité BM 6012, 1999.
- [21] V.PRABHASHANKAR, D. J. BADKAS, « Mechanism of oxidation of transformers oils », J.of Inst. Of petr., Vol. 47,n° 450, juin 1961, pp. 201-211.
- [22] E. N. SHTERN, S. S. KUZNETSOVA, N. A. KARPUKINA, T. S. MOGILEVA, « Oil oxidation temperature coefficient », Soviet Power Engineering, n°1, January 1981.
- [23] M. DUVAL, J. P. CRINE, « Dielectric behavior and stabilisation of insulating oils in EHV current transformers », IEEE Trans. Elec. Insul., Vol EL-20, n°2, April 1985, pp 437-441.
- [24] M. R. MESHKATODDINI, « A practical method for lifetime estimation of the used mineral oils », IEEE proceedings of 14th ICDL, Graz (Austria), July 7-12, 2002, pp. 305-308.

- [25] D. DHIBA « Etude du vieillissement de l'isolation papier/huile dans les transformateurs de puissance – influence des inhibiteurs d'oxydation » Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Toulouse, 1995.
- [26] A. SIEROTA, J. RUNGIS, « Electrical insulating oils – part I : characterization and Pre-treatment of new transformer oils », IEEE Electrical Insulating Magazine, Vol. 11, n°1 1995. pp.8-20.
- [27] Norme CEI 60422 (Draft Ed.3), « Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques », 2004.
- [28] J.FABRE, A. PICHON, « Deteriorating processes and products of paper in oil application to transformers » CIGRE, Paper n° 137, 1960.
- [29] Beroual. A., Zahn. M., Badent. A., et al.: 'Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics', IEEE Electr. Insul. Mag., 1998, 14, (2), pp. 6–17.
- [30] J.C. Devins, S.J. Rzed and R.J. Schwabe, J. Appl. Phys., vol. 52(7), pp. 4531-4545, 1981.
- [31] T. Aka-N'gnui, "Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides – Modèles des générations et de propagation", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2000.
- [32] A. Denat, J. P. Gosse, B. Gosse, "Conduction du cyclohexane très pur en géométrie pointe-plan", Rev. De Phys. Appl. 22, pp. 1103-1111, 1987.
- [33] R. Kattan, N. Bonifaci et A. Denat, "Étude de la génération de bulles dans les hydrocarbures liquides générées par les impulsions de *Trichel*", J. Phys. III (France), Vol.1, No. 7, Juillet 1991.
- [34] R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci, "Formation of Vapor Bubbles in Non –Polar Liquids Initiated by Current Pulses", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 26, No.4, pp. 656-662, August 1991.
- [35] R. Qotba, F. Aitken, A. Denat, "Étude de la génération de cavités par un dépôt fortement localisée d'énergie dans le n-pentane liquide en fonction de la température", J. of Electrostatics. 64, pp. 506 – 512, 2006.
- [36] F. Jomni, F. Aitken, A. Denat., "Dynamics of microscopic bubbles generated by a corona discharge in insulating liquids: influence of pressure", J. of Electrostatics.47, pp. 49 – 59, 1999.
- [37] A. Beroual and R. Tobazeon, "Propagation et génération des streamers dans les diélectriques liquides", J. of Phys. Appl. 22, pp. 1117 – 1123, 1987.
- [38] A. Beroual, Am. Journal of Appl. Phys., 73(9), 1 May 1993, pp.4528-4533.

- [39] A. Beroual and R. Tobazeon, "Effects of Hydrostatic Pressure on the Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids", IEEE Ann. Rep., CEIDP, Buffalo, pp. 44-49, 1985.
- [40] A. Beroual and R. Tobazeon, "Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 21, No. 4, pp. 613-627, 1986.
- [41] A. Larsson and M. Bengtsson, "The sequence of events in mid-gap laser-triggered, Electrical breakdown in liquid dielectrics", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol 9, No.3, pp. 349-352, 2002.
- [42] T. Aka-N'gnui and A. Beroual, "Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field", J. Phys. D: Appl. Phys. 34, pp. 1408-1412, 2001.
- [43] A. Beroual., "Relationship between Current, Charge and Propagation Velocity of Streamers in Dielectric Liquids", Archiwum Elektrotechniki., 1-4, pp. 45-56, 1993.
- [44] R. E. Hebner, "Measurement of electrical breakdown in liquids", Vol. B193: Plenum Press, 1988.
- [45] S. Sakamoto and H. Yamada, "Optical study of conduction and breakdown in dielectric liquids", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. EI-15, pp. 171-181, 1980.
- [46] K. L. Stricklett, C. Fenimore, E. F. Kelley, H. Yamashita, M. O. Pace, T. V. Blalock, A. L. Wintenberg and I. Alexeff, "Observation of partial discharge in hexane under high magnification", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol.26, No.4, pp. 692-698, 1991.
- [47] Beroual. A., Tobazeon. R.: 'Pre-breakdown phenomena in liquid dielectrics', IEEE Trans. Electr. Insul., 1986, EI-21, (4), pp. 613-627.
- [48] Y. Kamata and Y. Kako, "Flashover Characteristics of Extremely Long Gaps in Transformateur Oil under Non-uniform Field Conditions", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 15, pp. 18-26, 1980.
- [49] R. Badent, K. Kist and A.J. Schwab, "The effect of viscosity on streamer propagation in insulating oil under impulse conditions", 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, pp. 181-184, 1996.
- [50] A. Beroual, "Electronic processes and streamer phenomena in liquid dielectrics", Arch. Electr. Engineering, No. 4, pp. 579-592, 1995.
- [51] Y. Nakao, T. Yamazaki, K. Miyagi, Y. Sakai, H. Tagashira, "The Effect of Molecular Structure on Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids under a Non-uniform Field", Electr. Engineering in Japan, Vol.139, No.1, 2002.

- [52] H. Yamashita, "Effects of Chain Length on Prebreakdown Phenomena in Straight-Chain Saturated Hydrocarbon Liquids", *Electr. Engineering in Japan*, Vol. 122, No. 4, 1998.
- [53] N. Ngoc-Minh, "Comparaison des propriétés de claquage à haute tension d'esters naturels et synthétiques", 5ème Colloque sur les Matériaux pour le Génie électrique, MGE, Montpellier, 2010.
- [54] A. Beroual et R. Tobazeon, "Effets de la pression hydrostatique sur les phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides", *C. R. Acad. Sciences, Paris*, t. 303, No. 12, pp. 1081-1084, 1986.
- [55] P. K. Watson, W. G. Chadband and M. Sadeghzadeh-Araghi, "The Role of Electrostatic and Hydrodynamic Forces in the Negative-point Breakdown of Liquid Dielectrics", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 26, No. 4, pp. 543-559, August, 1991.
- [56] H. Yamada and T. Sato, "High Speed Electro-optical Measurement of Prebreakdown Current in Dielectric Liquids", *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol. 20, No. 2, pp. 261-267, 1985.
- [57] A. Beroual and R. Tobazeon, "Streamer initiation in liquid and solid cyclohexane with point-plane electrodes subjected to voltage steps", *J. of Physics D: Applied Physics*, 22, nr 10, pp. 1568-1569, 1989.
- [58] P. B. McGrath and J. K. Nelson, "Divergent field study of prebreakdown events in hexane", *J. Electrostatics*, Vol. 7, pp. 327-336, 1982.
- [59] E. O. Forster and P. Wong, "The dynamics of electrical breakdown in liquid hydrocarbons", *Conf. Rec. of the IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, Boston, pp. 222, 1980.
- [60] A. Beroual et A. Denat, "Analyse spectrale de la lumière émise par les streamers dans les diélectriques liquides", *C. R. Acad. Scien., Paris*, 306, pp. 187-192, 1988.
- [61] Beroual. A.: 'Spectral analysis of light emitted by streamers and gas chromatography in liquid dielectrics', *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, 32, (part1, 12A), pp. 5615-5620.
- [62] CEI 60156, "Isolants liquides : détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle", AFNOR, Ed., 1995.
- [63] ASTM D_1816-84a, "Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin using VDE Electrodes", *Annual Book of ASTM Standards*, Section 10, Volume 10.03, 1988.
- [64] R. Tobazeon, "Préclaquage et claquage des liquides diélectriques", *Techniques de l'ingénieur*, D 2450.

- [65] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, "Transformer Engineering Design and Practice", Marcel Dekker Inc, New York, 2004.
- [66] N. G. Trinh and C. Vincent, "Statistical Significance of Test Methods for Low Probability Breakdown and Withstand Voltages", IEEE Trans., PAS-99, No.2, pp.711-719, 1980.
- [67] W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", J. Appl. Mechanics, pp. 293 – 297, 1951.
- [68] Enis Tuncer, D. Randy James, Isidor Sauers, Alvin R. Ellis, Marshall O. Pace, "Dielectric breakdown statistics", J. Phys. D: Appl. Phys. 39, pp. 4257-4268, 2006.
- [69] R. M. Hill et L. A. Dissado, "Theoretical basis for the statistics of dielectric breakdown", J. Phys. C: Solid State Phys., 16, pp. 2145-2156, 1983.
- [70] X. Wang and Z. D. Wang, "Particle Effect on Breakdown Voltage of Mineral and Ester Based Transformer Oils", Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Québec, Canada, 2008.196.
- [71] H. Yilmaz and S. Guler, "The Effect of Electrode Shape, Gap and Moisture on Dielectric Breakdown of Transformer Oil", 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [72] T. D. Chau, "Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension", Thèse de Doctorat, INP de Grenoble, 2009.
- [73] C. Vincent, C. Benoit and R. Olivier, "Comparative Evaluation of Parameters of the Dielectric Breakdown Test on Transformer Oil", 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [74] A. NIKURADSE « Das flüssige dielektrikum (le diélectrique liquide) » Springer Verlag, Berlin 1934, 222p.
- [75] A. BEROUAL, « Electronic and gaseous processes in prebreakdown phenomena of dielectric liquids », J. Appl. Phys. 37 (9), 1993.
- [76] W. Rottenberg, "Étude des phénomènes de préclaquage dans les huiles isolantes dans des systèmes d'électrodes couverts de couches minces", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2000.
- [77] A. Zouaghi, "Étude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 1997.

- [78] C. Tran Duy, A. Denat, O. Lesaint, N. Bonifaci, Y. Bertrand, W. Daound and M.Hassanzadeh, "Influence of ageing on conduction and breakdown in rape-seed and mineral oils", International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, France, 2008.
- [79] E. Gockenbach and H. Borsi, "Natural and Synthetic Ester Liquids as alternative to mineral oil for power transformers", Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Québec, Canada, 2008.
- [80] W.F. Schmidt, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. 26 No. 4, pp.560-567, August 1991.
- [81] N. Felici, Journées d'études du CNRS, Grenoble 1986, pp.88-92.
- [82] P.K.Watson, IEEE Ann. Rep. Conf. on Elect. Ins. and Diel. Phen., pp.370-376, 1981.
- [83] P.Keith Watson, W.G. Chadband and M. Sadeghzadeh-Araghi, IEEE Trans. On Elect. Ins., Vol. 26 No.4, August 1991.
- [84] P.K. Watson, M. Iqbal Qureichi and W.G.(Bill) Chadband, Conf. Rec. Of the ICDL '96 12th Inter. Conf. On Cond. And Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [85] H. MOULAI, « Etude des courants de pré-claquage dans les diélectriques liquides » Thèse de doctorat d'état Ecole nationale Polytechnique d'Alger Octobre 2001.
- [86] A. Beroual, Archives of Electrical Engineering, volume XLIV, N°4, pp.579-592, 1995.
- [87] I. Fofana and A. Beroual, Jpn. J. of Appl. Phys., Vol.37, Part 1 No.5A, 1998, pp.2540-2547.
- [88] N. Dhahbi-Meghriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl, J. of Appl. Phys., D. Appl. Phys., No.30, 1997, pp.889-894.
- [89] Yu.V. Torshin, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.2 No1, 1995, pp.167-179.
- [90] A. Beroual et R. Tobazeon, Journées d'études du CNRS, Grenoble 1986, pp.99-104.
- [91] Yu.V. Torshin, 7th Int. Symp. On High Volt. Engin., 1991, pp.17-20.
- [92] A.Beroual and C.Brosseau, Ann. Rep., CEIDP. pp. 476-579, West Virginia, USA, 1995.
- [93] A. Beroual and I. Fofana, Conf. Rec. Of the ICDL 96', 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, 1996, pp. 214-217.
- [94] H. Moulai et A. Beroual, Alg. J. of Tech. (AJOT), No.9, 1993, pp.105-116.
- [95] Beroual, A., Moulai, H.: 'Prebreakdown currents analysis in insulating oils under AC voltages – relation to breakdown', Arch. Electr. Eng., 2001, L, (1), pp. 115–127.

- [96]. B. LEHOUIDJ; A. NACER; Y. HADJI; H. MOULAI; A. BEROUAL, "Inter-correlations between emitted lights and corresponding currents associated to different energy level spark discharges in mineral oil submitted to high-voltage direct current stresses", IET Science, Measurement & Technology, Web Of Science-Thomson Reuters; Impact Factor: 0.982. 2016, Volume: 10, Issue: 7. Pages: 768 – 775.
- [97]. B. LEHOUIDJ, S. SAHRA, A. NACER, H. MOULAI, A. BEROUAL, "Streamer Currents, Emitted Lights and Energies into Dielectric Liquids Submitted to DC Stress", IEEE-ICDL 2014, International Conference on Dielectric Liquids 30 June - 3 July 2014, Bled, Slovenia.
- [98]. S. SAHRA, B. LEHOUIDJ, Y. HADJI, A. NACER, H. MOULAI, A. BEROUAL, "Pre-Breakdown and breakdown Currents and Correlated Light Emissions Analysis in Liquid Dielectrics", The 19th International Symposium on High Voltage Engineering ISH, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015.
- [99]. S. SAHRA, B. LEHOUIDJ, H. MOULAI, A. NACER, A. BEROUAL, Analyse des Courants et des Emissions Lumineuses des Streamers dans L'Huile Minérale, ALGERIAN LARGE ELECTRICAL NETWORK CONFERENCE - CAGRE'15, Alger, 24-26 Mars 2015.
- [100]. B. LEHOUIDJ, A. NACER, H. MOULAI, Y. HADJI, "Inter-Correlations between Emitted Lights and Corresponding Currents Associated to Spark Discharges in Liquid Dielectrics", 12th International Conference on Condensed Matter and Statistical Physics (ICCMSP) October 30 - November 01, 2013 Errachidia - Morocco.
- [101]. S. SAHRA, Y. HADJI, B. LEHOUIDJ, F. ABERKANE, H. MOULAI, A. NACER, A. BEROUAL, 'Développement de Techniques de Diagnostic des Systèmes de Puissance par L'analyse des Emissions Photoniques Associées aux Décharges Luminescentes', International Conference on Electrical Engineering, Oran, November 2013.
- [102] Dung, N.V., Høidalen, H.K., Linhjell, D., et al.: 'Effects of reduced pressure and additives on streamers in white oil in long point-plane gap', J. Phys. D, Appl. Phys., 2013, 46, (25), p. 255501.
- [103] Torshin, Y.V.: 'Initiation and propagation of the negative leader in transformer oil under impulse voltage', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2009, 16, (6), pp. 1536–1542.
- [104] Pompili, M., Mazzetti, C., Bartnikas, R.: 'PD pulse burst behavior of a transformer type synthetic organic ester fluid', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2008, 15,(6), pp. 1498–1506.
- [105] Denat, A.: 'High field conduction and prebreakdown phenomena in dielectric liquids', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2006, 13, (3), pp. 518–525.

- [106] Aka-Ngnui. T., Beroual. A., Perrier. C.: 'Pre-breakdown phenomena in synthetic ester and silicone oils for power transformers'. Proc. IEEE Int. Conf. On Dielectric Liquids (ICDL), Futuroscope-Chasseneuil, France, 30 June–03 July 2008, pp. 1–4.
- [107] Deshpande. A.S., Mangalvedekar. H.A., Cheeran. A.N.: 'Partial discharge analysis using energy patterns', *Electr. Power Energy Syst.*, 2013, 53, pp. 184–195.
- [108] Sarathi. R., Reid. A.J., Judd. M.D.: 'Partial discharge study in transformer oil due to particle movement under DC voltage using the UHF technique', *Electr. Power Syst. Res.*, 2008, 78, (11), pp. 1819–1825.
- [109] Qin. J., Pasko. V.P.: 'On the propagation of streamers in electrical discharges', *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 2014, 47, (43), p. 435202.
- [110] Rozga. P., Stanek. M.: 'Characteristics of streamers developing at inception voltages in small gaps of natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse', *IET Sci. Meas. Technol.*, 2016, 10, (1), pp. 50–57.
- [111] Sharkawy. R.M., Abdel-Galil. T.K., Mangoubi. R.S., et al.: 'Particle identification in terms of acoustic partial discharge measurements in transformer oils', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2008, 15, (6), pp. 1649–1656
- [112] Markalous. S.M., Tenbohlen. S., Feser. K.: 'Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2008, 15, (6), pp. 1576–1583.
- [113] Amarasinghe. D., Sonnadara. U., Berg. M., et al.: 'Correlation between brightness and channel currents of electrical discharges', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2007, 14, (5), pp. 1154–1160.
- [114] Bonifaci. N., Denat. A.: 'Spectral analysis of light emitted by prebreakdown phenomena in non-polar liquids and gases', *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 1991, 26, (4), pp. 610–614.
- [115] Denat. A., Bonifaci. N.: 'Spectral analysis of the light emitted by streamers in hydrocarbon liquids'. Conf. Record of the ICDL'96, 12th Int. Conf. On Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy, 15–19 July 1996, pp. 243–246.
- [116] Denat. A., Bonifaci. N., Nur. M.: 'Spectral analysis of the light emitted by streamers in hydrocarbon liquids', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1998, 5, (3), pp. 382–387.
- [117] Denat. A., Bonifaci. N.: 'Spectroscopic investigation of electrical discharges in liquids'. Proc. of 14th Int. Conf. on Dielectric Liquids (ICDL), Graz, Austria, 12–15 July 2002, pp. 285–288.

- [118] Barmann. P., Kröll. S., Sunesson. A.: ‘Spectroscopic measurements of streamer filaments in electric breakdown in a dielectric liquid’, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 1996, 29, (5), p. 1188.
- [119] Brosseau. C., Beroual. A.: ‘Optical investigation of high-field conduction and prebreakdown in a dielectric liquid’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1994, 1, (3), pp. 397–402.
- [120] Kohtoh. M., Kaneko. S., Okabe. S.: ‘Aging effect on electrical characteristics of insulating oil in field transformer’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2009, 16, (6), pp. 1698–1706.
- [121] Kaatze. U.: ‘Measuring the dielectric properties of materials. Ninety-year development from low-frequency techniques to broadband spectroscopy and high-frequency imaging’, *Meas. Sci. Technol.*, 2013, 24, (1), p. 012005.
- [122] IEEE Std. C57.149™: ‘Guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers’, 2012.
- [123] Kaatze. U.: ‘Perspectives in dielectric measurement techniques for liquids’, *Meas. Sci. Technol.*, 2008, 19, (11), p. 112001.
- [124] Maradia. U., Hollenstein. C., Wegener, K.: ‘Temporal characteristics of the pulsed electric discharges in small gaps filled with hydrocarbon oil’, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 2015, 48, (5), p. 055202.
- [125] Kolb. J.F., Joshi. R.P., Xiao. S., et al.: ‘Streamers in water and other dielectric liquids’, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 2008, 41, (23), p. 234007.
- [126] Herchl. F., Marton. K., Tomčo. L., et al.: ‘Breakdown and partial discharges in magnetic liquids’, *J. Phys., Condens. Matter*, 2008, 20, (20), p. 204110.
- [127] Moulai. H., Nacer. A., Beroual. A.: ‘Dissolved gases analysis in relation to the energy of electrical discharges in mineral oil’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, 19, (2), pp. 498–504.
- [128] Nacer. A., Moulai. H., Beroual. A.: ‘Streamers optical and electrical characteristics correlations in liquid dielectrics under alternating current stress’, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2014, 34, (5), pp. 1067–1080.
- [129] Rain. P., Lesaint. O.: ‘Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and ac voltage in large-gap divergent fields’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1994, 1,(4), pp. 692–701.
- [130] P. Gournay and O. Lesaint, “A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane”, *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 26, pp. 1966-1974, 1993.

Résumé

Les huiles isolantes utilisées dans les équipements de puissance fonctionnant sous hautes tensions sont souvent le siège de décharges partielles qui se produisent entre des points de potentiels différents aussi appelées streamers. Ces derniers sont très néfastes et causent une accélération du vieillissement des huiles. Pour cette raison, beaucoup de travaux de recherche les ont étudiés. Notre travail s'intéresse particulièrement aux courants et aux émissions lumineuses associés à ces événements. Une analyse énergétique a permis de classer les streamers en trois classes en adoptant un nouveau critère qui est la puissance moyenne. L'analyse fréquentielle n'a pas abouti à un critère de reconnaissance (comme souhaité), mais le calcul de corrélation a permis de mettre en évidence le caractère aléatoire des courbes de courant et de lumière ainsi que la quantification de la ressemblance existante entre les deux. Un modèle électrique a été développé pour la représentation de la propagation des streamers très puissants qui aboutissent à des arcs. Une validation de ce modèle a été réussie en utilisant les mêmes techniques précédentes.

Abstrat

The insulating oils used in power equipments operating under high voltages are often the seat of partial discharges that occur between very different voltage elements and also called streamers. These last are very detrimental and cause a great acceleration of oil aging. For this reason, several research works have studied them. Our work is particularly interested in currents and emitted lights associated to these events. An energy analysis allowed classifying the streamers into three classes according to new criteria that is the average power. The frequency analysis did not lead (as desired) to a criterion of recognition, but the correlation computations made it possible to highlight the randomness of the currents and emitted lights signals as well as the quantification of the similarities between them. An electric model has been developed for the representation of the propagation of the most powerful streamers that lead to arcs. A validation of the model was successfully obtained using the same previous techniques.

ملخص

الزيوت العازلة المستعملة داخل التجهيزات ذات الإستطاعة العالية و التي تشتغل بتوتّرات مرتفعة جدا تكون عادة موقعا لتفريغات جزئية بين العناصر المحمولة لكمونات جد مختلفة و تسمى ايضا "streamers". هذه الأخيرة مضرّة جدا و تسبب تسارع كبير لظاهرة تقادم الزيوت. لهذا السبب الكثير من اعمال البحث إهتمت بدراستها. عملنا هذا يهتم تحديدا بالتيارات و الإنبعاثات الضوئية المرتبطة بهذه الحوادث. التحليل او الدراسة الطاقوية سمحت بتصنيف ال "streamers" الى ثلاثة مجموعات إستنادا الى معيار جديد و هو الإستطاعة المتوسطة. التحليل التواتري او الطيفي لم يسمح بالوصول الى معيار تعرف كما كان منتظرا في حين سمح حساب الارتباط بتسليط الضوء على ميزة العشوائية في بيانات التيار و الإنبعاثات الضوئية زيادة على تكميم التشابه بينهما. تم تطوير نموذج كهربائي لتمثيل إنتشار ال "streamers" ذات الإستطاعات العليا و التي تنتهي بإنهيار كلي للعازل. تم تصديق هذا النموذج الكهربائي بإستعمال كل التقنيات السابقة الذكر.