
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

L'ionisation de la basse atmosphère

par M. BRINGUIER
38000 Grenoble

CADRE DE CETTE ÉTUDE

Le sujet de cet article est de montrer expérimentalement l'ionisation de l'air, d'étudier ses variations et l'influence que peut avoir cette ionisation sur nos expériences d'électrostatique. Cela veut dire que ce ne sera pas un article purement théorique mais que je souhaite la participation active du lecteur pour faire lui même les expériences proposées, en imaginer d'autres et finalement tirer de l'enseignement de l'électrostatique toutes les vertus hautement pédagogiques qu'il renferme. Je compte pour cela sur le fait qu'en tout physicien, digne de ce nom, sommeille toujours ou un astronome amateur ou un amateur de physique du globe ou les deux à la fois et qu'il suffit souvent d'une simple lecture pour déclencher un intérêt passionné pour ces disciplines.

BREF HISTORIQUE

Normalement l'air n'est pas conducteur : c'est pourquoi nos prises électriques ne sont pas particulièrement protégées à cet égard et baignent dans l'air sans inconvénients. Pourtant, dès que les tensions atteignent des valeurs élevées, l'isolement n'est plus parfait : des effluves électriques apparaissent aux environs des câbles sous haute tension et dans un domaine plus modeste lorsque nous chargeons un corps, étant donné en général sa très faible capacité, des tensions assez élevées apparaissent aussi. C'est ainsi qu'en atmosphère sèche les sous-vêtements en soie ou en matières synthétiques se chargent et

provoquent, lorsqu'on les enlève, de petites étincelles parfaitement visibles dans l'obscurité.

Historiquement c'est Coulomb qui semble avoir signalé pour la première fois la légère conductibilité de l'air. En effet, ayant suspendu par un fil de soie une sphère métallique électrisée, il constata que sa charge diminuait progressivement. De la même façon un électroscope chargé, même soigneusement protégé, se décharge spontanément plus ou moins vite. C'est l'étude de cette décharge qui allait conduire à la découverte et à l'étude des rayons cosmiques. La faible conductivité de l'air à proximité du sol, (c'est à ce domaine de la basse atmosphère, du mètre à la centaine de mètres, que se limite cet article), a d'abord été attribuée à la faible radioactivité du sol et des traces des gaz radioactifs contenus dans l'atmosphère. Le fait que cette conductivité augmentait avec l'altitude a infirmé cette explication et conduit à la découverte et à l'étude des rayons cosmiques. C'est donc à cette radiation extrêmement pénétrante, capable encore à base altitude de traverser plusieurs centimètres de plomb, qu'est due essentiellement la formation des ions, la radioactivité naturelle ne pouvant jouer qu'un rôle local et en général secondaire.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Pour étudier et préciser numériquement cette faible ionisation nous décrivons ici un matériel très simple, bien connu des physiciens mais réalisé d'une façon un peu particulière. C'est ainsi que l'électroscope permettra la libre entrée de l'air ambiant où baigneront donc les éléments de cet appareil. On peut pour cela construire facilement un électroscope qui satisfera à cette condition. Cet appareil peut être réalisé sous deux formes différentes.

Le premier modèle est constitué d'un cadre rectangulaire de polystyrène auquel est fixée à la partie supérieure une petite plaque de zinc de la largeur du cadre et prolongée par une feuille mince de zinc comportant en O un étrier sur lequel repose une épingle servant d'axe de rotation à une sorte d'aiguille légère (figures 1 et 2). La plaque de zinc et la feuille mince sont naturellement reliées électriquement, formant ainsi un seul conducteur.

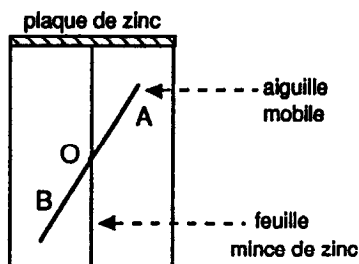


Figure 1

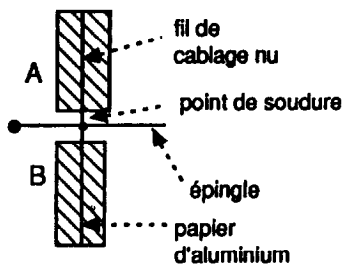


Figure 2

L'aiguille mobile est constituée de quelques centimètres de fil de câblage nu auquel l'épingle est fixée par un point de soudure, le reste du fil de câblage est enrobé dans deux feuilles planes de papier d'aluminium collées de part et d'autre du fil. Les deux parties A et B ont un poids très léger et voisin avec un très léger excès pour B obtenu si nécessaire par une très faible surcharge d'un petit morceau de papier d'aluminium.

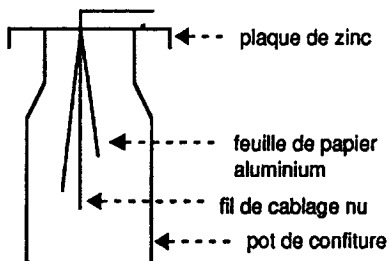


Figure 3

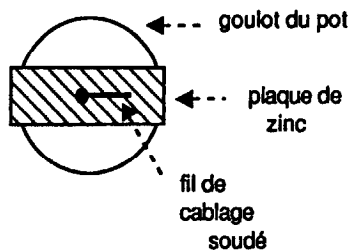


Figure 4

Une deuxième façon, peut être plus simple à réaliser et permettant d'organiser des travaux pratiques d'électrostatique, est d'utiliser un pot de confiture. Certains d'entre eux ont même deux faces planes parallèles et certains pots de moutarde ont même quatre faces planes à travers lesquelles il est facile d'observer l'état d'électrisation. A cheval sur le goulot de ces pots on place une plaque mince rectangulaire de zinc plus longue que le diamètre de ce goulot et dont la largeur est inférieure à ce même diamètre. Les extrémités de cette lame sont repliées à angle droit pour assurer la stabilité de cette plaque au cours

des manipulations (figure 3 et 4). En son centre on a percé un petit trou par lequel passe un fil de câblage nu de quelques centimètres de longueur replié à 90° sur la plaque de zinc et fixé par quelques points de soudure à cette plaque. Au niveau de la partie supérieure de ce fil sont fixées de part et d'autre, au moyen d'un peu de scotch, deux lamelles de papier d'aluminium qui constituent les feuilles mobiles de notre électroscope. On remarquera que le goulot est ouvert à l'air et permet sa libre circulation.

Pour étudier les phénomènes d'électrisation et nous permettre de savoir à chaque instant ce qui se passe nous utiliserons le champmètre. Pour des raisons de fiabilité, de sensibilité et de robustesse je choisirai le champmètre décrit par M. PELLISSIER dans le B.U.P. n° 565 de mai 1974.

Le schéma, facile à réaliser est représenté figure 5. Il y a naturellement d'autres modèles de champmètre. L'un de nos collègues, M. Marcel GUINET a décrit dans n° 650 du B.U.P. de janvier 1983 un ingénieux champmètre électronique ne comportant qu'un seul transistor, un BD 522 Canal N.

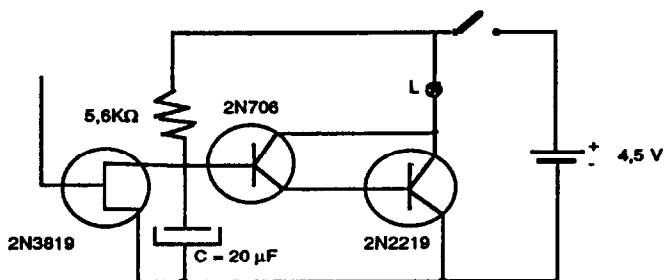


Figure 5

J'ai eu beaucoup de plaisir à manipuler avec lui mais malheureusement il n'a pas résisté très longtemps aux «tortures» expérimentales auxquelles je l'ai soumis. Par contre j'utilise depuis plusieurs années le champmètre de Pellissier qui a bien résisté à toutes les fantaisies électrostatiques qui lui ont été imposées.

Pour électriser on peut utiliser une règle plate en matière plastique. Frottée avec un chiffon de laine elle s'électrise négativement comme on peut le constater en l'approchant de l'antenne du champmètre : sa lampe L s'allume. Frottée au contraire avec une feuille souple de

polychlorure de vinyle (P.V.C.) elle s'électrise positivement comme on le constate en l'éloignant de l'antenne du champmètre dont la lampe L s'allume alors. Il faut préciser que l'antenne du champmètre est formée d'un fil conducteur lié à la porte du 2N3819 et entouré d'une gaine isolante de plastique qui, par frottement s'électrise négativement comme on peut le constater en utilisant un morceau de ce fil tenu au moyant d'un isolant : frotté et approché de l'antenne du champmètre la lampe de celui-ci s'allume.

MISE EN ÉVIDENCE DE L'IONISATION DE L'AIR

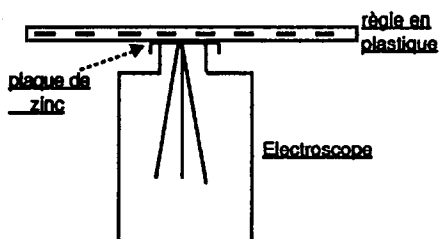


Figure 6

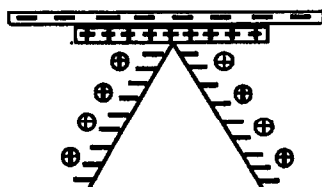


Figure 7

C'est en quelque sorte une variante de l'expérience de Coulomb. Sur le plateau d'un des électroscopes décrits précédemment on pose la règle en plastique électrisée (figure 6). Supposons d'abord qu'elle soit chargée négativement : par influence les électrons du conducteur sont repoussés vers les feuilles mobiles de l'électroscope et le plateau de ce dernier abandonné par les électrons se charge positivement. Si la règle reste en place un certain temps les échanges entre un isolant (la règle) et un conducteur (le plateau de l'électroscope) étant lents et difficiles, ce sont les échanges entre les feuilles conductrices de l'électroscope et les ions libres positifs de l'air qui l'emportent : les feuilles se rapprochent et lorsqu'on enlève la règle, les feuilles de l'électroscope divergent à nouveau et si l'on éloigne le champmètre de l'électroscope sa lampe s'allume (figure 8).

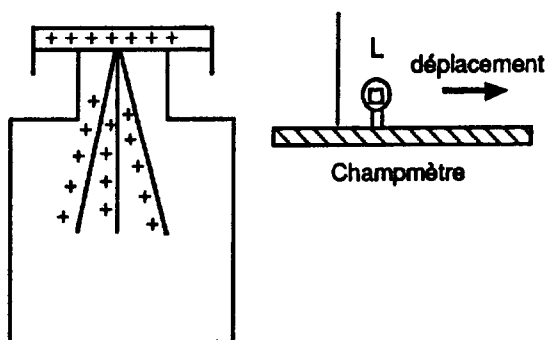


Figure 8

On recommence l'expérience avec la règle chargée positivement par frottement avec la feuille de P.V.C. : placée sur le plateau de l'électroscope elle attire les électrons et crée une charge positive au niveau des feuilles de l'électroscope qui divergent. Les échanges entre les ions libres négatifs de l'air et les charges positives des feuilles métalliques de l'électroscope déchargent celles-ci. Si à ce moment on enlève la règle, les feuilles de l'électroscope divergent et, en approchant l'antenne du champmètre, sa lampe s'allume montrant qu'il est bien chargé négativement.

Ces expériences réussissent particulièrement bien lorsque les ions des deux signes sont nombreux, comme nous le verrons plus loin, en certaines saisons et par temps sec.

La conclusion est donc qu'il existe dans l'air en permanence un mélange de molécules neutres (azote et oxygène en particulier) et d'ions positifs et négatifs.

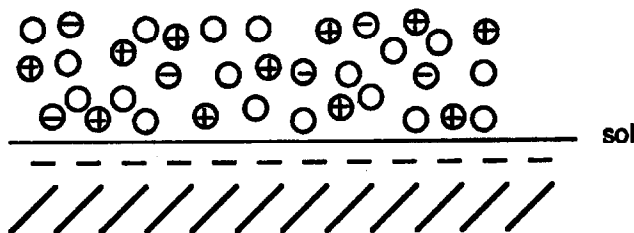


Figure 9

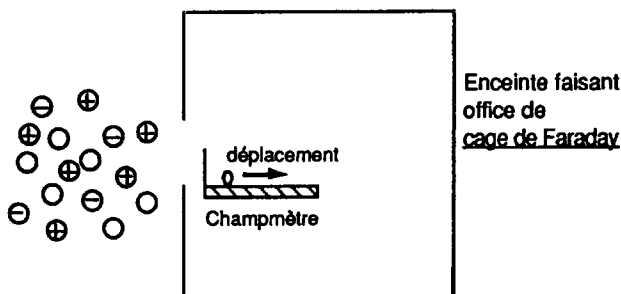


Figure 10

On sait d'autre part que le sol porte en général des charges négatives (figure 9) : il y a donc un léger excès d'ions positifs au voisinage du sol et jusqu'à une certaine hauteur où s'exerce le champ électrique terrestre. C'est ce que l'on pourra constater avec le champmètre de l'intérieur d'une sorte de cage de Faraday réalisée approximativement par un appartement d'un immeuble en béton armé, d'un balcon avec balustrade en fer et de dalles soutenues par des supports en fer ou mieux de l'intérieur d'une voiture dont une seule fenêtre est ouverte.

En manipulant le champmètre au niveau de la fenêtre, si en le reculant vers l'intérieur sa lampe s'allume c'est qu'effectivement il y a bien à l'extérieur un excès de charges positives.

Si par contre la lampe s'allumait en déplaçant le champmètre de l'intérieur vers l'extérieur c'est qu'il y aurait un excès de charges négatives. Enfin il est possible que le champmètre déplacé dans les deux sens ne donne rien soit parce que le local dans lequel on opère ne constitue par une sorte de cage de Faraday soit parce que l'atmosphère est électriquement neutre par égalité du nombre des ions positifs et des ions négatifs, ce qui arrive certains jours et en certaines saisons. En opérant de la même façon on pourra également mettre en évidence les charges éventuelles de la pluie, négatives, positives ou sa neutralité.

ÉTUDE QUANTITATIVE DE L'ÉTAT D'IONISATION

Une véritable mesure exigerait la détermination du nombre d'ions des deux signes. Cela entraînerait l'utilisation de matériel et de méthodes assez complexes. D'autre part les spécialistes de la physique du globe nous signalent que les résultats sont très variables. Ch. MAU-

RAIN dans son ouvrage «Physique du globe» écrit : «Il arrive souvent qu'on obtienne des résultats différents avec des appareils peu éloignés les uns des autres».

Nous utiliserons donc une méthode plus simple qui sans être une véritable mesure constituera un «repérage» numérique précis. On peut comparer cela, si l'on veut à la «mesure» de la température au moyen de l'échelle centésimale qui n'est en fait qu'un simple repérage dont nous connaissons pourtant tout l'intérêt.

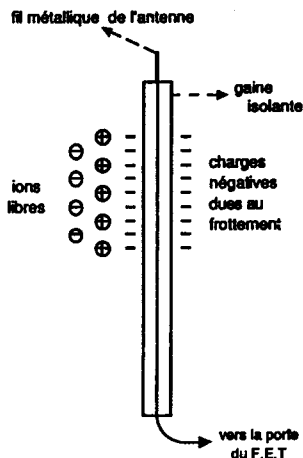


Figure 11

C'est le champmètre qui nous permettra ce repérage. Pour cela la gaine isolante du fil métallique de l'antenne sera électrisée par frottements en la prenant entre l'index et le pouce et en exerçant une pression comme si l'on voulait «claquer des doigts». La gaine isolante de l'antenne libérée rapidement des doigts conserve une charge négative qui repousse les électrons du fil métallique de l'antenne, bloque la porte du T.E.C. (F.E.T. en anglais) et provoque l'allumage de la lampe du champmètre (figure 11). L'éclairement persiste tant que la charge négative se maintient mais par suite de l'existence des ions atmosphériques elle est progressivement neutralisée par les ions positifs et la porte du T.E.G. redevient conductrice : la lampe du champmètre s'éteint. Il est évident que la neutralisation des charges négatives est d'autant plus rapide - et donc la durée de l'éclairement plus courte - que les ions positifs sont plus nombreux.

On peut essayer d'établir une formule donnant la vitesse de neutralisation des charges négatives et donc la durée de l'éclairement de la lampe du champmètre. Il faut faire pour cela quelques hypothèses plus ou moins arbitraires et je laisse au lecteur le soin de le faire car son seul intérêt est de montrer que les petites différences de charges créées par des frottements qui ne sont pas toujours identiques - même si l'on s'entraîne à exercer la même pression sur la gaine de l'antenne - n'ont qu'une faible influence sur la durée de l'éclairement de la lampe du champmètre. C'est bien ce que l'on constate au point de vue expérimental : les valeurs des temps t d'éclairement obtenues par

excitation répétée de l'antenne sont bien groupées et leur moyenne donne un bon ordre de grandeur de t .

VARIATIONS DE L'IONISATION ATMOSPHERIQUE

Lorsqu'on fait régulièrement des relevés du temps t - ce qui est facile avec le champmètre, beaucoup plus difficile et long avec l'électroscope - on constate que l'état d'ionisation de l'atmosphère varie parfois d'un moment à l'autre, d'un jour à l'autre, d'une saison à une autre, d'une année à l'autre. Les durées des temps t observées vont d'une fraction de seconde à la minute et parfois à plusieurs dizaines de minutes.

VARIATIONS JOURNALIÈRES

Je prendrai l'exemple de deux journées consécutives de janvier 1979 (tableaux 1 et 2).

15 janvier 1979	Heures des relevées	8 h	14 h	17 h	22 h 15
	t	4 m 15 s	4 m 05 s	6 m 20 s	6 m 55 s

Tableau 1

16 janvier 1979	Heures des relevées	8 h	14 h	17 h	22 h 30
	t	20 m 10 s	4 m 30 s	8 m	20 m

Tableau 2

On voit donc sur cet exemple caractéristique que l'état d'ionisation varie d'heure en heure, de jour en jour, et que les valeurs d'éclairement de la lampe du champmètre sont particulièrement élevées, ce qui signifie que les ions atmosphériques sont peu nombreux.

VARIATION MENSUELLES, VARIATIONS SAISONNIÈRES

Si l'on fait la moyenne de tous les relevés quotidiens sur l'ensemble d'un mois, on obtient une moyenne globale mensuelle qui varie d'un mois à l'autre souvent d'une façon très sensible : à cet égard l'exemple de l'année 1979 est remarquable.

1979	mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin
	t mensuel	3 m 10 s	2 m 18 s	1 m 18 s	1 m 03 s	25 s	2,2 s

1979	mois	juillet	août	sept.	octobre	novemb.	décemb.
	t mensuel	3,11 s	1,98 s	1,30 s	1,24 s	5,97 s	5,91 s

Tableau 3

Durant les mois d'hiver il y avait d'une part un excès d'ions positifs et d'autre part des durées d'éclairement de la lampe du champmètre, qui étaient en général bien supérieures à la minute, changeant assez brusquement en mai et durant tout ce que l'on peut appeler la belle saison pour se compter à partir de ce moment en secondes. C'est naturellement à cette époque que les ions des deux signes sont les plus nombreux et en quantités pratiquement égales ce qui correspond à la neutralité observée au champmètre.

VARIATIONS SUIVANT LES ANNÉES

Si l'on compare, à quelques années d'intervalle, les valeurs moyennes mensuelles des mois correspondant à ces années on constate une variation parfois importante : c'est ce que montre le tableau 4 relatif à l'année 1988 rapproché du tableau 3 de 1979.

1988	mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin
	t mensuel	4,98 s	9,65 s	11,54 s	2,3 s	1,36 s	1,27 s

1988	mois	juillet	août	sept.	octobre	novemb.	décemb.
	t mensuel	1,23 s	0,86 s	1,02 s	0,88 s	5,28 s	5,21 s

Tableau 4

On voit donc qu'il existe des différences très sensibles de l'état d'ionisation d'une année à l'autre mais que l'influence des saisons apparaît toujours comme un facteur prépondérant.

Il ne faut pas voir là une influence quelconque d'une variation éventuelle du rayonnement cosmique car : «Ni l'heure, ni la saison, ni l'activité solaire, ni les circonstances astronomiques n'ont sur les rayons cosmiques aucune influence importante» (Fleury et Mathieu, Physique générale et expérimentale, tome 8, chapitre 10).

Il est aussi difficile à côté de ce facteur prépondérant que constituent les saisons d'essayer de montrer une influence éventuelle de l'activité solaire sur l'état d'ionisation de la basse atmosphère. C'est pourtant ce qu'avait essayé de faire les jeunes gens du club d'astronomie du lycée Champollion (qui avaient obtenu pour leur club et pour d'autres travaux le prix Marcel Moye de la Société Astronomique de France) en tentant d'établir, sur une durée d'un an une corrélation éventuelle entre activité solaire et intensité d'ionisation : les résultats avaient été négatifs. Mais les mesures portant sur plusieurs années n'autorisent pas une conclusion aussi catégorique. On pourrait voir en effet dans les valeurs élevées d'éclairement de l'hiver 79 les répercussions du maximum d'activité solaire de cette année ainsi que celle du minimum de 1988 sur les faibles valeurs de t pour l'hiver 88. Une comparaison détaillée est effectuée dans l'article suivant. Mais de toutes façons, comme nous l'avons déjà dit, ce sont les variations climatiques saisonnières qui restent le facteur prépondérant.

EFFETS SPECTACULAIRES ET VALEUR PÉDAGOGIQUE DE L'ÉLECTROSTATIQUE

Pour certains l'électrostatique se réduit aux effets spectaculaires des hautes tensions qu'ils peuvent voir dans les temples modernes de la science.

Mais la nature n'a pas attendu l'homme pour réaliser ces effets et prodiguer ces brillantes illuminations qui se développent dans certaines conditions en particulier sur les parties pointues et qu'on appelle les Feux Saint Elme. L'histoire nous a conservé le souvenir de certaines de ces manifestations. Je ne pousserai pas l'irrévérence jusqu'à remonter à Moïse et prétendre que son buisson ardent n'était qu'un simple buisson épineux en proie aux Feux Saint Elme ne serait-ce que parce que les Feux Saint Elme... ne parlent pas ! Pourtant le texte est si clair, si direct, si évocateur que je ne résiste pas au plaisir de le citer : «Il remarqua que le buisson était en feu et cependant ne se consumait pas. Moïse se dit : "Je veux m'approcher, je veux examiner ce grand phénomène : pourquoi le buisson ne se consume pas"'. C'est alors que la voix lui dit : "n'approche point d'ici, ôte ta chaussure"» (La Bible, Exode, chap. III). N'est ce pas une mise en garde, une mesure de précaution de façon à épouser sans danger l'équipotentielle du sol ?

Ces Feux Saint Elme ont été observés dans les déserts, en particulier dans le Sud Algérien par temps de sirocco. Ces phénomènes connus dans l'antiquité sous le nom de Castor et Pollux ont été décrits par plusieurs auteurs anciens : Plutarque, Pline, César, dans ses «Commentaires», raconte que, pendant la guerre d'Afrique, après un violent orage, les pointes des dards de ses soldats brillaient d'une lumière spontanée. Enfin les grands navigateurs : Magellan, Christophe Colomb, ont observé les Feux Saint Elme à la pointe des mats de leurs navires. Plus près de nous l'astronome Baldet a été témoin de Feux Saint Elme très intenses à l'observatoire du Pic du Midi.

Pour être moins spectaculaires les expériences que nous avons décrites n'en ont pas moins un très grand intérêt pédagogique. Elles peuvent exciter la curiosité des élèves, les obliger à réfléchir, à chercher une explication logique formant ainsi leur esprit à la rigueur scientifique.

Une connaissance approfondie des faits expérimentaux, une parfaite maîtrise dans ce domaine garantissent le succès dans l'enseignement de l'électrostatique.

BIBLIOGRAPHIE

Revues

- B.U.P. n° 565 : *Réalisation d'un appareil destiné à la mise en évidence d'un champ électrique* (J.P. PELLISSIER).
- B.U.P. n° 592 : *Électrostatique - Electrocinétique - Électronique* (M. BRINGUIER).
- B.U.P. n° 650 *Le Champmètre Électronique* (M. GUINET).
- B.U.P. n° 657 : *Électrisation, Propriétés et comportement de certaines matières plastiques* (M. BRINGUIER).
- B.U.P. n° 636 : *Le champmètre et l'Électrostatique* (M. BRINGUIER).
- B.U.P. n° 547 : *Électricité Atmosphérique* (M. HENRY).

Livres

- P. FLEURY et J.P. MATHIEU : *Physique Générale et Expérimentale* - Tome VII - Chapitre 13.

- P. FLEURY et J.P. MATHIEU : *Physique Générale et Expérimentale* - Tome VIII - Chapitre 10 : Rayons Cosmiques.
- P. FLEURY et J.P. MATHIEU : Tome VI - Chapitre 17 : Courants dans les gaz.
- FEYNMAN : Tome II - Électromagnétisme-1 - Chapitre 9 : L'Électricité dans l'Atmosphère.
- LE PRINCE-RINGUET : L'Aventure de l'Électricité.
- Les Rayons Cosmiques - Que sais je.
- Ch. MAURAIN - La Foudre - Armand Colin.
- A. LAUVILLIER : La Physique Cosmique - Flammarion.
- M. A. BOUTARIC : La Physique Moderne et l'Électron - Éditions Félix Alcan.
- Ch. MAURAIN : Physique du Globe - Éditions Armand Colin.