

2130
E.E. M + S.E.E.S
4750

V

Vassal
Dukhan



INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

Observatoire de MBOUR

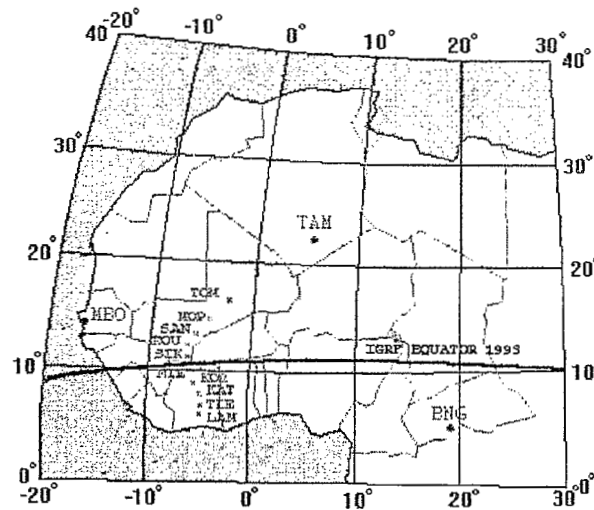
ANNEE INTERNATIONALE DE L'ELECTROJET EQUATORIAL (AIEE)
SECTEUR AFRIQUE

I
DISPOSITIF ORSTOM D'ETUDE DE L'ELECTROJET

II
PREMIERS RESULTATS

J. Vassal, M. Dukhan

ORSTOM Dakar Mai 1994



ORSTOM - DAKAR
cote 30-8-96
10247 cote D.D. VAS

ORSTOM
Géophysique
Dept. TOA
BP 1386 - Dakar
Sénégal



Fonds Documentaire ORSTOM,
Cote: Bx 18032 Ex: unique

SOMMAIRE

	page
Introduction	1
Première partie: Dispositif ORSTOM d'étude de l'Electrojet	
1. Le projet de l'ORSTOM	2
1.1. Choix des sites	2
1.2. Instrumentation	
1.2.1. Les capteurs	3
1.2.2. Les acquisitions	4
1.2.3. Alimentation et surveillance	4
1.3. La base de données	4
1.4. Le point du réseau en Mars 1994	6
1.5. Le contexte géomagnétique	6
1.5.1. Le champ régional	6
1.5.2. L'équateur magnétique	7
Figures 1 à 5	8-13
Deuxième partie: Premiers résultats	
2. Traitement et analyse des données	14
2.1. Effets de l'EJ sur le champ tellurique	14
2.1.1. La variation diurne	15
2.1.2. Les variations de type D	15
2.2. La composante magnétique D	16
2.3. Les composantes magnétiques H et Z	16
2.3.1. la composante H- Centre et intensité	17
2.3.2. La composante Z- Dissymétries N-S	18
2.4. Le contre-Electrojet	18
3. Conclusion	19
Remerciements	19
Références	20
Figures 6 à 13	22-29

Année Internationale de l'Electrojet Equatorial (AIEE)
Secteur Afrique

I

Dispositif ORSTOM d'étude de l'électrojet équatorial

II

Premiers résultats

Jacques Vassal, Michel Dukhan

Introduction

C'est en 1987, à l'assemblée de Vancouver de l'LAGA (International Association for Geomagnetism and Aeronomy) que l'IDCDC (Inter Divisional Commission for Developing Countries) a proposé à la communauté scientifique mondiale d'intensifier l'étude de l'électrojet équatorial dans le cadre d'un projet international, l'AIEE (Année Internationale de l'Electrojet Equatorial). Ce projet AIEE doit améliorer nos connaissances de l'aéronomie, de l'électrodynamique et des autres phénomènes physiques qui contrôlent l'électrojet équatorial (EJ). Un comité français pour l'AIEE, réunissant des laboratoires de plusieurs organismes (CEA, CNET, CNRS, IPGP, NCAR, Université Paris Sud, LETTI, ORSTOM) fut alors créé pour coordonner les projets scientifiques au niveau français.

Dans la première partie de ce rapport, nous décrivons le dispositif ORSTOM mis en place pour l'étude de l'électrojet équatorial: description du réseau, présentation du matériel utilisé, création de la base de données et étude du contexte géomagnétique régional.

La deuxième partie présente les premiers résultats obtenus après un an de fonctionnement de notre réseau. Pour la première fois, nous avons une confirmation expérimentale des hypothèses de Fambitakoye (1976) selon lesquelles les effets internes induits par l'électrojet sont négligeables pour le S_R et ne sont sensibles que pour les perturbations.

Nous présentons aussi, de manière exhaustive, les principaux effets dus à l'EJ sur les variations magnétiques: variabilité journalières, effets saisonniers, dissymétries nord-sud etc...

**Année internationale de l'Electrojet Equatorial (AIEE)
Secteur Afrique**

1ère Partie

Dispositif ORSTOM d'étude de l'électrojet équatorial

1. Le projet de l'ORSTOM

Dans le cadre de l'AIEE, la géophysique de l'ORSTOM a proposé au comité un projet d'étude de l'Electrojet. Notre objectif scientifique est l'étude de l'électrojet en tant que partie d'un circuit électrique global, ainsi que l'étude des courants telluriques et des conductivités terrestre à l'échelle régionale. Pour cela, nous enregistrons les variations des champs magnétique et tellurique générés dans la zone équatoriale par l'électrojet. La nouveauté de notre projet par rapport aux études de l'électrojet faites dans les années 1970 par Fambitakoye (1976), en dehors du fait qu'il se situe dans un secteur géographique différent, consiste en l'étude des variations du champ tellurique.

De plus, la détermination permanente pendant plusieurs mois (2 ans d'enregistrements sont prévus) des paramètres de l'électrojet servira de base aux études ionosphériques plus ponctuelles faites par ionosonde, radar, interféromètre etc...

Il a donc été décidé de mettre en place une chaîne de 10 stations placée sur la même longitude, et recoupant une grande partie de l'électrojet.

1.1. Choix des sites

Le choix des sites est soumis à un certain nombre de contraintes liées d'une part aux conditions locales, et d'autre part aux objectifs à atteindre:

- L'extension géographique du réseau est limitée au sud par la mer, et au nord par le désert. Les bornes extrêmes du réseau sont donc Abidjan au sud, et Tombouctou au nord.

- Pour l'étude par la MT (Magnéto-Tellurie) des conductivités locales, il est préférable de ne pas mettre les stations au voisinage d'accidents géologiques notables, telles que les failles importantes. On a donc fait une étude préalable de la géologie régionale (Bessoles, 1977) pour éviter les zones géologiques singulières.

- Nous voulons pouvoir définir les paramètres de l'électrojet tels que position du centre, largeur, intensité... Pour une bonne modélisation de l'électrojet, les stations doivent donc encadrer les points remarquables des courbes de variation du champ magnétique: maxima et minima, points d'inflexion. En supposant l'électrojet centré sur l'équateur magnétique on a calculé la position théorique de cet équateur pour 1993 à partir des modèles globaux IGRF (International Geomagnetic Reference Field) de Langel (1992), Puis on a tracé les courbes de variation du champ en prenant différents modèles d'électrojet (Fambitakoye, 1971). On a pu ainsi définir les points remarquables théoriques des courbes de variations magnétiques.

- Les dernières contraintes sur l'emplacement des stations concernent la logistique: facilité d'accès, possibilité de gardiennage etc..

Sur la carte de la figure 1 on a reporté la position des stations du profil, ainsi que des 3 observatoires magnétiques permanents de Mbour (MBO), Bangui (BNG) et Tamanrasset (TAM) dont les données seront utilisées pour nos études.

Le réseau AIEE s'étend sur 1200 km de part et d'autre de l'équateur magnétique, approximativement le long du méridien 5° Ouest.

Le tableau I donne la localisation des stations qui ont été positionnées par le système satellite GPS (Global Positionnement system)

SITE	CODE	N°	LATITUDE	LONGITUDE	ALTIT.
TOMBOUCTOU	TOM	1	16.733°	-03.000°	260 m.
MOPTI	MOP	2	14.508°	-04.087°	270
SAN	SAN	3	13.237°	-04.879°	300
KOUTIALA	KOU	4	12.356°	-05.448°	380
SIKASSO	SIK	5	11.344°	-05.706°	360
NIELLE	NIE	6	10.203°	-05.636°	350
KORHOGO	KOR	7	09.336°	-05.427°	380
KATIOLA	KAT	8	08.183°	-05.044°	400
TIEBESSOU	TIE	9	07.218°	-05.241°	200
LAMTO	LAM	10	06.232°	-05.017°	150

Tableau I. Nom, code et localisation géographique (Latitudes Nord, Longitudes Ouest en degrés décimaux) des stations

1.2. Instrumentation

La figure 2 donne le schéma synoptique d'une station.

1.2.1. Les capteurs

Le matériel de base de notre instrumentation est constitué des capteurs et acquisitions de type MOSNIER utilisé depuis plusieurs années pour des études magnéto-telluriques. Ce matériel a été complété et modifié pour l'étude spécifique de l'AIEE.

Les capteurs telluriques sont constitués de paires d'électrodes en plomb, distantes de 200 mètres suivant les directions Nord-Sud et Est-Ouest. Ils permettent l'enregistrement des courants telluriques dont les tensions varient suivant l'état géologique du sous-sol de quelques millivolts à quelques dizaines de millivolts par kilomètres.

Les capteurs magnétiques horizontaux H (Nord-Sud) et D (Est-Ouest) sont de type à aimant asservi par un système capacitif. Ils délivrent un signal électrique continu dans la gamme ± 2 Volts, avec une sensibilité de 10 mV/nT.

Le capteur Z à vanne de flux a spécialement été conçu et mis au point pour l'AIEE au Centre de Recherches Géophysiques (CRG) de Garchy (Note technique CRG/INST/05/92: Z-mètre à vanne de flux. Etude du prototype de capteur). La réalisation de l'électronique s'appuie sur les travaux du Service des Observatoires Austraux de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) et tient compte des développements effectués par le CRG dans le cadre du projet MAGELAN. Ce capteur a une sensibilité de 10 mV/nT.

1.2.2. Les acquisitions

Le système d'acquisition numérique utilisé, de type MOSNIER, a été développé au CRG. Le signal analogique provenant des différents capteurs est digitalisé à raison d'un point par minute après être passé à travers un filtre anti-aliasing.

Les données sont ensuite organisées par blocs data de 128 octets constitués d'un label de 8 octets, donnant les caractéristiques de l'enregistrement, suivi de 120 octets de données (12 données par voie), chaque donnée étant codée en binaire sur 12 bits, soit une dynamique de 4096 digits pleine échelle. La durée de chaque bloc, qui dépend du nombre de voies et de la cadence d'échantillonnage, est, dans notre cas, de 12 minutes.

Chaque bloc data ainsi formaté est alors enregistré séquentiellement sur une carte mémoire de type RAM (Random Access Memory). Suivant la capacité de la carte RAM, l'autonomie d'enregistrement d'une station est de 33 jours (carte de 512 kilo-octets) ou 66 jours (carte de 1 méga-octets).

Pour les besoins de l'AIEE, notre parc d'acquisition a été complété et amélioré. On a fait modifier en particulier la programmation du microprocesseur de gestion afin de calculer et conserver en mémoire les moyennes horaires des différentes voies.

1.2.3. Alimentation et surveillance

Les stations sont alimentées par une batterie chargée à travers un régulateur par des panneaux solaires. Chaque station est équipée d'une balise ARGOS qui envoie toutes les 200 secondes un message de 32 octets donnant l'état de fonctionnement de la station: état de charge de la batterie (test sur 2 seuils de tension), label du dernier bloc data enregistré (date, heure, numéro de station, état de remplissage de la carte mémoire) et 2 données par voie.

Cette surveillance jour à jour des stations nous donne une idée de la qualité des données recueillies et permet d'intervenir rapidement en cas de problème technique tel que décharge de la batterie, dérive ou panne d'un capteur ou de l'horloge de la station. On reçoit en moyenne 3 à 4 messages par jour et par station.

Les messages bruts reçus sur n'importe quel récepteur ARGOS SRDM sont ensuite décodés par nos propres logiciels. N'ayant pas de récepteurs propre à l'AIEE, nous utilisons, à Bamako et à Dakar, les récepteurs des services de l'hydrologie.

Exemple de reception ARGOS d'un message envoyé par la station de Tombouctou:

DECODAGE BALISE 1958 du 06-04-94 au 14-04-1994 TOMBOUCTOU

DATE ARGOS	DATE STATION	Lieu	acqu	cad	voie	bloc	Batteries	D	H	NS	EW	Z	D	H	NS	EW	Z
6/ 4/94 16h43mn	6/ 4/94 16h24mn	1	10	60	5	1227(14%)	+ -	1970	2049	3520	2234	1135	1976	2049	3680	2235	1137
6/ 4/94 18h21mn	6/ 4/94 18h 0mn	1	10	60	5	1235(15%)	+ -	2074	2049	3376	2235	1193	2077	2049	3360	2237	1199
7/ 4/94 7h35mn	7/ 4/94 7h12mn	1	10	60	5	1301(15%)	+ -	2540	2048	4000	2235	1304	1042	2819	436	2613	2258

1.3. La base de données

Les données sont régulièrement relevées aux stations en vidant sur un micro portable la carte mémoire. On crée alors sur le disque un fichier qui est une copie brute de la carte RAM. Ce fichier est ensuite décodé, vérifié, éventuellement corrigé. Puis on génère un fichier définitif constitué de 2 blocs d'en-tête de 128 octets chacun contenant toutes les caractéristiques de la station et de l'enregistrement (codes de station, dates de début et de fin d'enregistrement, amplification des voies etc..) suivis de N blocs de données de 128

octets chacun. Chaque bloc de données est constitué de 8 octets de label de date et de 2*60 octets de données.

La base de données est constitué de deux types de fichiers: Fichiers de données brutes (fichiers .DEC), et fichiers de moyennes horaires (fichiers .HOR). Elle est archivée, avec son logiciel de traitement (Vassal et Dukhan, 1993), sur cartouche de disque dur 3,5 pouces de 105 Méga-octets (cartouche SyQuest modèle SQ310) compatible avec le lecteur externe PUMA 105 de SyDos.

I- **Données brutes** à raison d'un point par minute et par voie. La taille de chaque fichier de données brutes, peut atteindre 1.2 Méga Octets. Les fichiers de valeurs minutes ont l'extension .DEC (nom.DEC) et sont codés en binaire.

Les fichiers nom.DEC sont constitués de N+2 blocs de 128 octets:

- bloc 1: En-tête 1 comportant en alphanumérique toutes les caractéristiques de l'enregistrement

- bloc 2: En-tête 2, texte de commentaires en alphanumérique.

- blocs 3 à N+2: blocs données: 8 octets de label donnant en code ASCII la date de début de bloc: an (1 octet), mois (1 octet), jour (1 octet), heure (1 octet), minute (1 octet), seconde (1 octet), et 2 zéros comme marque de fin de label, suivis de 2*60 octets de données, les données étant codées en binaire sur 2 octets.

Les valeurs des voies se suivent en séquence:

voie 1: D, voie 2: H, voie 3: Nord-Sud, voie 4: Est-Ouest, voie 5: Z

La durée de chaque bloc est de 12 minutes. Il y a donc 12 données par voie et par bloc. La valeur numérique d'une donnée est: $V = (\text{code ASCII octet } i) * 256 + (\text{code ASCII octet } i + 1)$

Pour avoir la valeur réelle d'une donnée (en nT ou mV/km), il faut diviser la valeur du fichier par l'amplification de la voie correspondante.

Exemple: décodage bloc par bloc du fichier MOP9211.DEC. Les valeurs obtenues sont en nT ou mV/km.

```
Nom de Station: **MOPTI    **
CADENCE= 60 VOIE: 5
AMPLIFICATIONS= 10.0 10.0 8.0 8.0 10.0
DATE DEBUT= 92-11-22      18h 0mn
DATE FIN   = 92-11-23      8h12mn
NBR. DE BLOCS: 74
Notes:
BLOC 10 DATE 92 11 22 19 24 0
V. 1: 214.2 213.8 213.3 213.1 212.8 212.6 212.6 212.5 212.1..
V. 2: 189.8 188.4 187.3 186.5 185.5 184.7 183.5 182.4 181.6..
V. 3: 248.3 248.1 248.0 248.1 248.5 248.3 248.3 248.1 248.5..
V. 4: 266.5 266.5 266.4 266.3 266.1 266.6 266.5 266.4 266.0..
V. 5: 217.2 217.2 217.2 217.2 217.3 217.4 217.3 217.3 217.2..
BLOC 11 DATE 92 11 22 19 36 0
V. 1: 212.3 212.6 213.6 214.8 215.3 215.7 215.9 216.3 216.7..
V. 2: 178.8 177.6 177.0 176.4 175.5 174.9 174.6 173.8 173.1..
V. 3: 249.1 249.9 251.4 250.9 250.6 250.6 250.3 250.4 249.8..
V. 4: 266.1 265.1 264.4 264.5 264.8 264.1 264.9 264.9 264.8..
V. 5: 217.3 217.3 217.2 217.3 217.4 217.4 217.5 217.7 217.6..
```

II- **Données de moyennes horaires** (une valeur horaire par voie). Les fichiers de moyennes horaires sont en ASCII et ont l'extension .HOR (nom.HOR). Leur taille ne dépasse pas 60 k-octets. Les données démarrent à la première heure ronde suivant la date de début de l'enregistrement. Le fichier est constitué de 4 lignes de commentaires donnant les caractéristiques de la station (nom, coordonnées, altitude) et les dates de début et de fin de données. Suivent les données (en nT ou mV/km) jour par jour pour les 5 composantes. Chaque ligne à le format suivant:

date au format AA MM JJ, numéro de voie, 24 valeurs horaires. La valeur 999:9 indique un manque de donnée.

Exemple: fichier horaire KOU9211.HOR

DONNEES MAGNETIQUE AIEE:

Station KOUTIALA Lat 12.35 Nord Long 5.44 Ouest Alti 0.4 km

MOYENNES HORAIRES en valeurs (nT ou mV/km) du fichier

KOU9211.dec

Date Début :26/11/92 03h Date fin : 27/11/92 17h

Notes:

Date	voie	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h
92 11 26	1	999.9	999.9	999.9	198.7	192.0	191.7	192.8	193.9..	
92 11 26	2	999.9	999.9	999.9	113.0	112.0	110.2	114.0	125.8..	
92 11 26	3	999.9	999.9	999.9	88.3	89.5	90.6	91.5	91.6..	
92 11 26	4	999.9	999.9	999.9	99.8	99.1	98.4	97.7	97.7..	
92 11 26	5	999.9	999.9	999.9	238.4	240.4	241.3	242.2	237.5..	
92 11 27	1	201.3	199.9	197.3	196.5	195.0	193.6	193.9	195.2..	
92 11 27	2	119.6	124.4	128.1	134.8	133.5	133.5	137.4	147.1..	
92 11 27	3	82.7	84.4	85.4	86.5	87.2	87.9	88.6	89.1..	
92 11 27	4	99.4	99.4	99.1	98.8	97.8	97.4	97.1	96.9..	
92 11 27	5	238.5	237.6	238.0	238.0	237.9	238.6	241.0	238.3..	

1.4. Le point du réseau en Mars 1994.

Le réseau de station a été installé en novembre 1992 à l'exception de la station de Tombouctou qui n'a pu être installée qu'en février 1993 pour des raisons de difficultés d'accès. A part une période de rodage ou nous avons eu quelques problèmes d'alimentation dûs à une sous estimation de l'ensoleillement, le réseau fonctionne de façon satisfaisante depuis novembre 1992.

Les figures 3a et 3b visualisent les plages d'enregistrement aux stations à fin mars 1994 avec les noms des fichiers de données.

On a tracé figure 4 un exemple d'enregistrement des valeurs minute des 5 composantes magnéto-telluriques (D, H, NS, EO, Z) à la station de Korhogo du 16 au 20 décembre 1992.

1.5. Le contexte Géomagnétique.

1.5.1. Le champ régional.

Au cours de l'année 1993, nous avons effectué une campagne de réoccupations de bases magnétiques dans toute l'Afrique de l'Ouest (Vassal et al., 1993). Les mesures, réduites à la mi-93, permettent de définir les valeurs du champ régional moyen (champ interne non perturbé) le long du profil. les valeurs du champ horizontal (H) et vertical (Z) vont de H=30.000 nT et Z=-8.000 nT (Lamto) à H=33.000 nt et Z=+4.500 nT (Tombouctou).

La figure 5 montre les variations en latitude de H et Z le long du profil (5° Ouest) pour le champ IGRF calculé, ainsi que pour les valeurs réelles mesurées aux bases magnétiques et aux stations AIEE. On vérifie ainsi que les modèles IGRF donnent une très bonne approximation du champ en Afrique de l'ouest (Vassal, 1987).

Les variations diurnes normales, ainsi que la contribution due à l'électrojet se superposent à ce champ moyen.

1.5.2. L'équateur magnétique.

Les mêmes mesures de réoccupations nous permettent de préciser la position moyenne de l'équateur magnétique, défini par $Z=0$ nT. A la mi-1993, sur le méridien 5° Ouest, l'équateur magnétique au sol est à 11.20° Nord. La position en latitude de la valeur $Z=0$ est indiquée sur la figure 5.

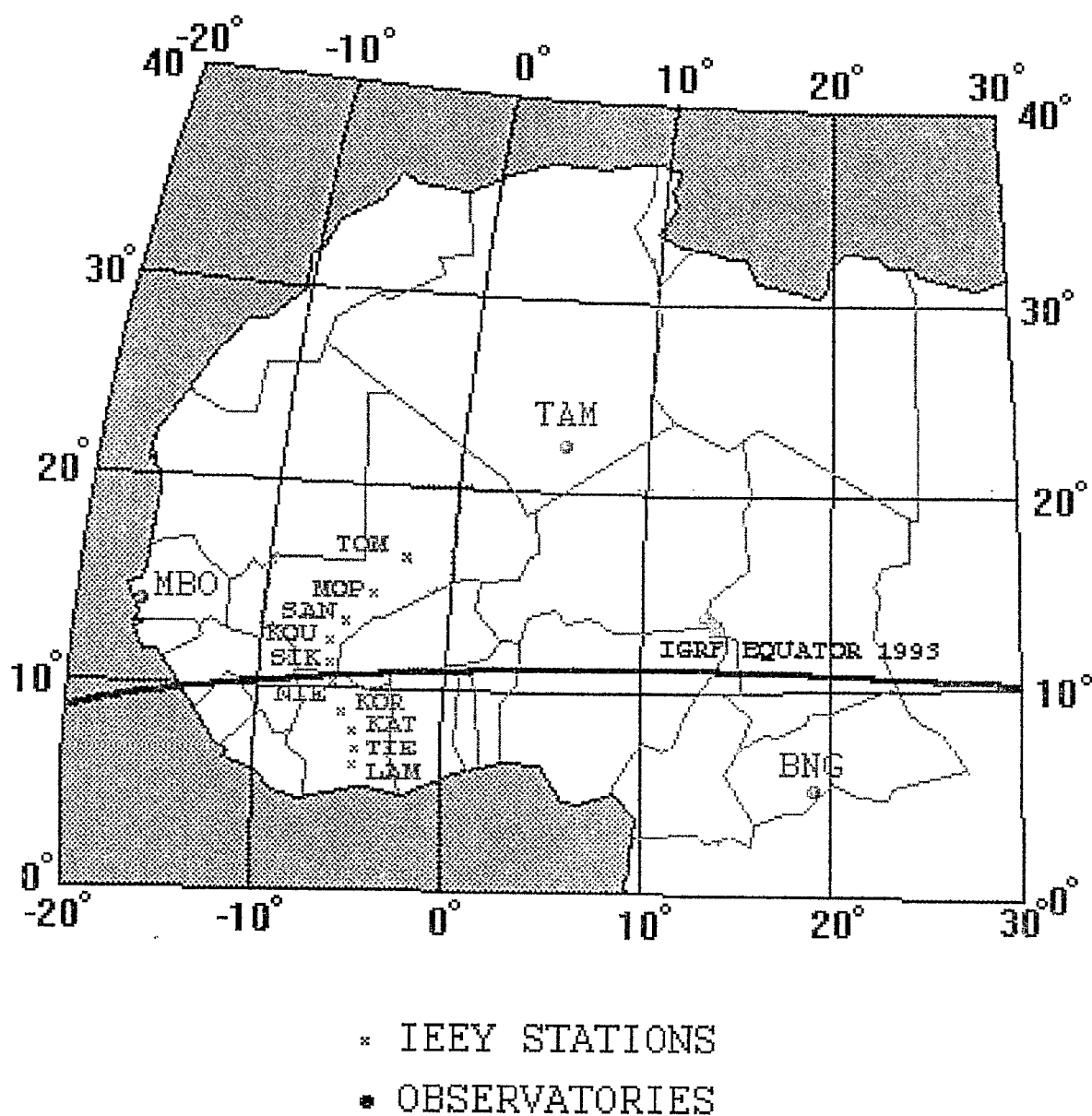


Figure 1 - Localisation géographique des stations AIEE (x) au Mali et en Côte d'Ivoire, et des observatoires (●) de Mbour (MBO), Bangui (BNG) et Tamanrasset (TAM). On a tracé la position de l'équateur IGRF (Z=0 nT) pour 1993.

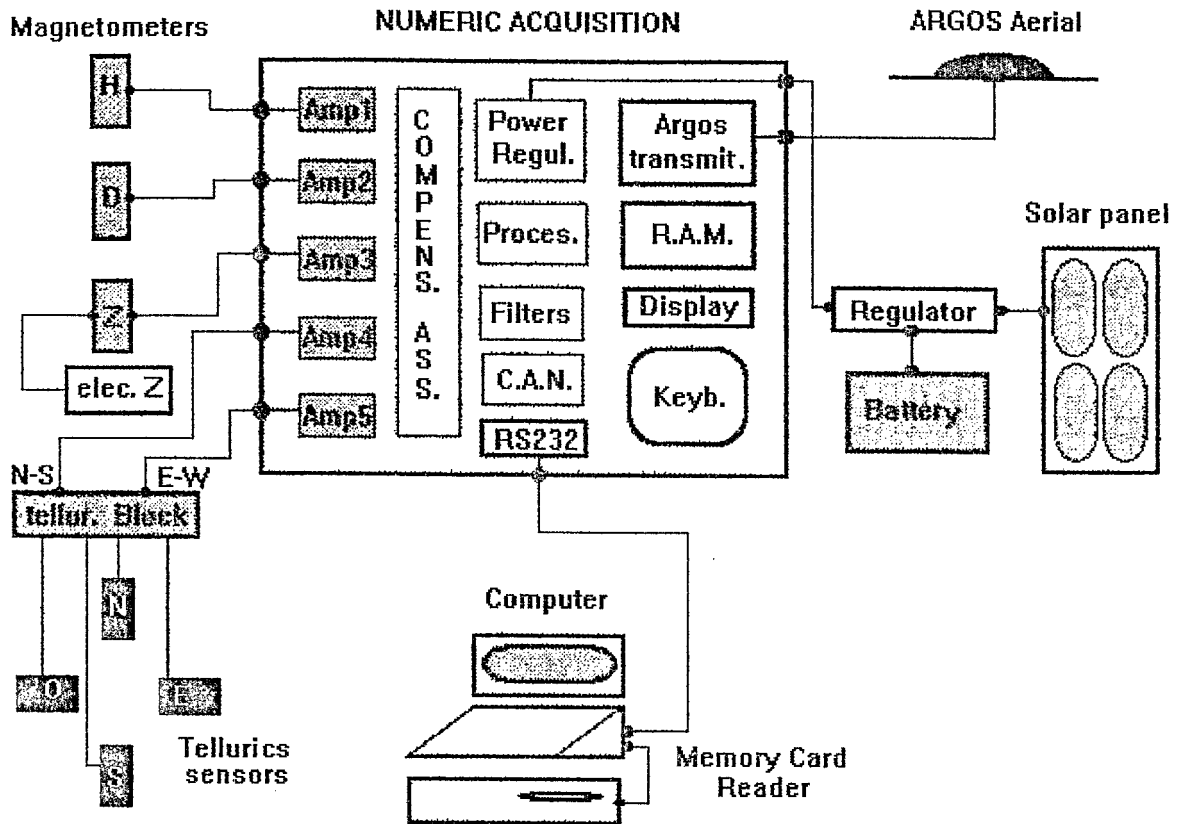
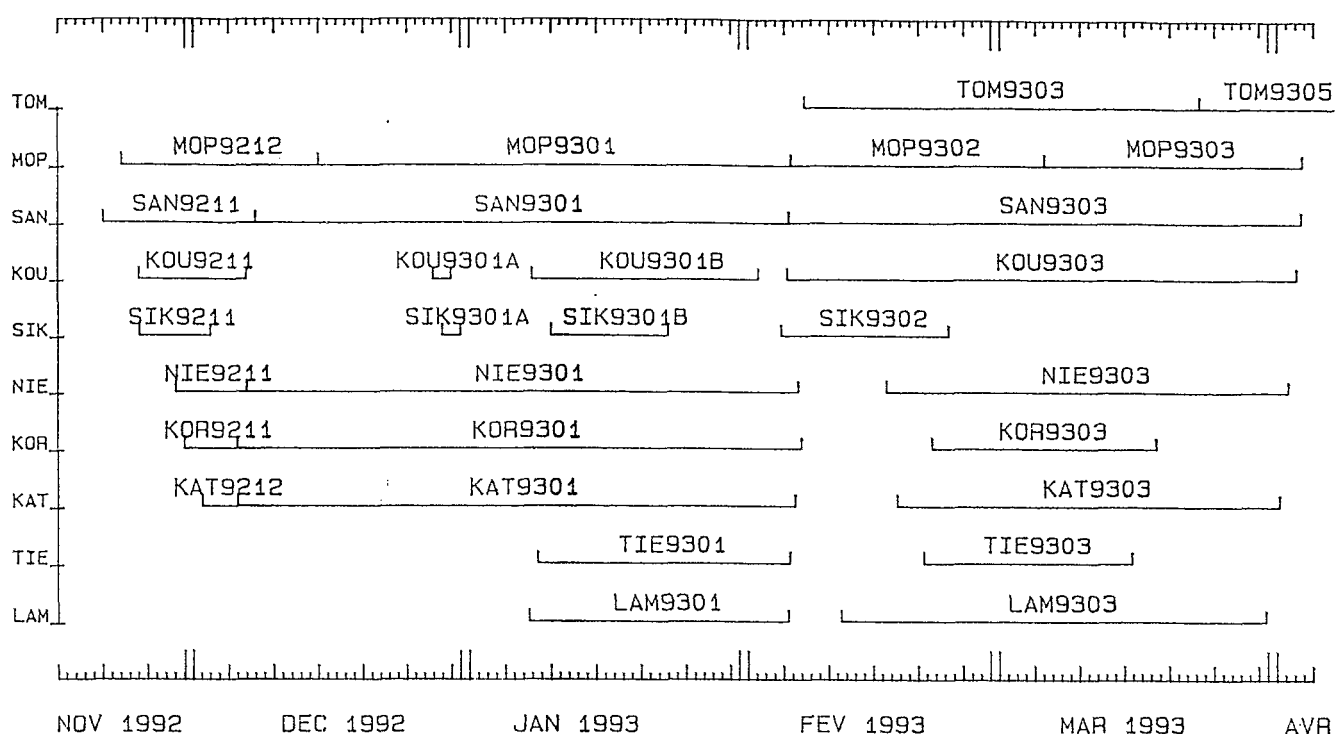
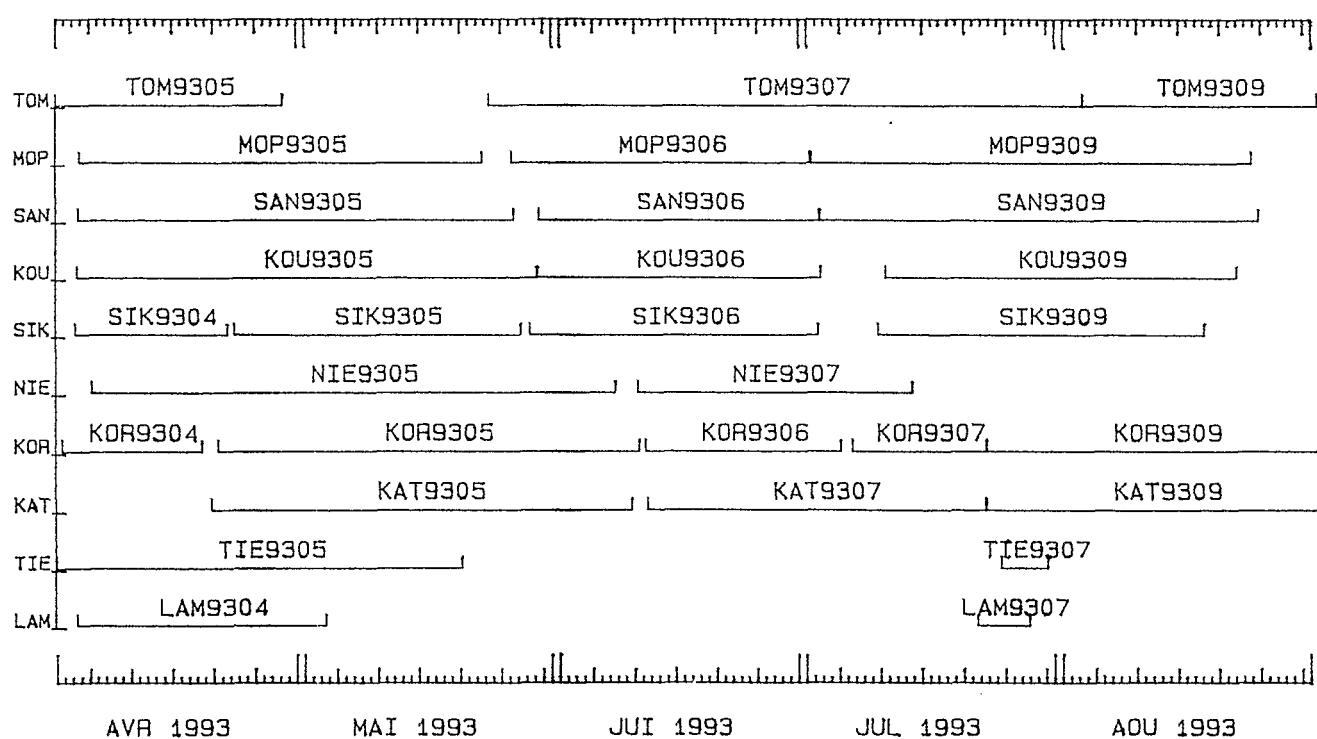


Figure 2 - Synoptique d'une station magnéto-tellurique AIEE.

CATALOGUE DES DONNEES MAGNETIQUES A.I.E.E.

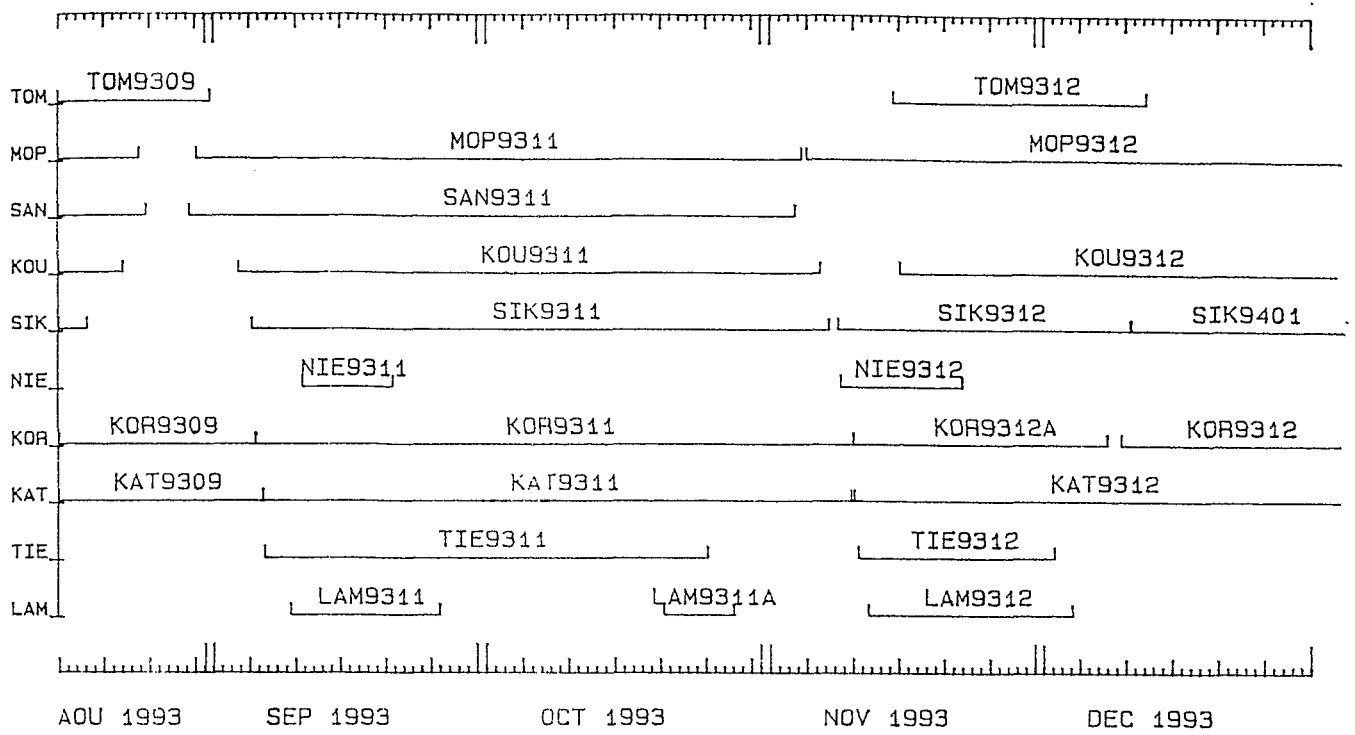


CATALOGUE DES DONNEES MAGNETIQUES A.I.E.E. (suite1)

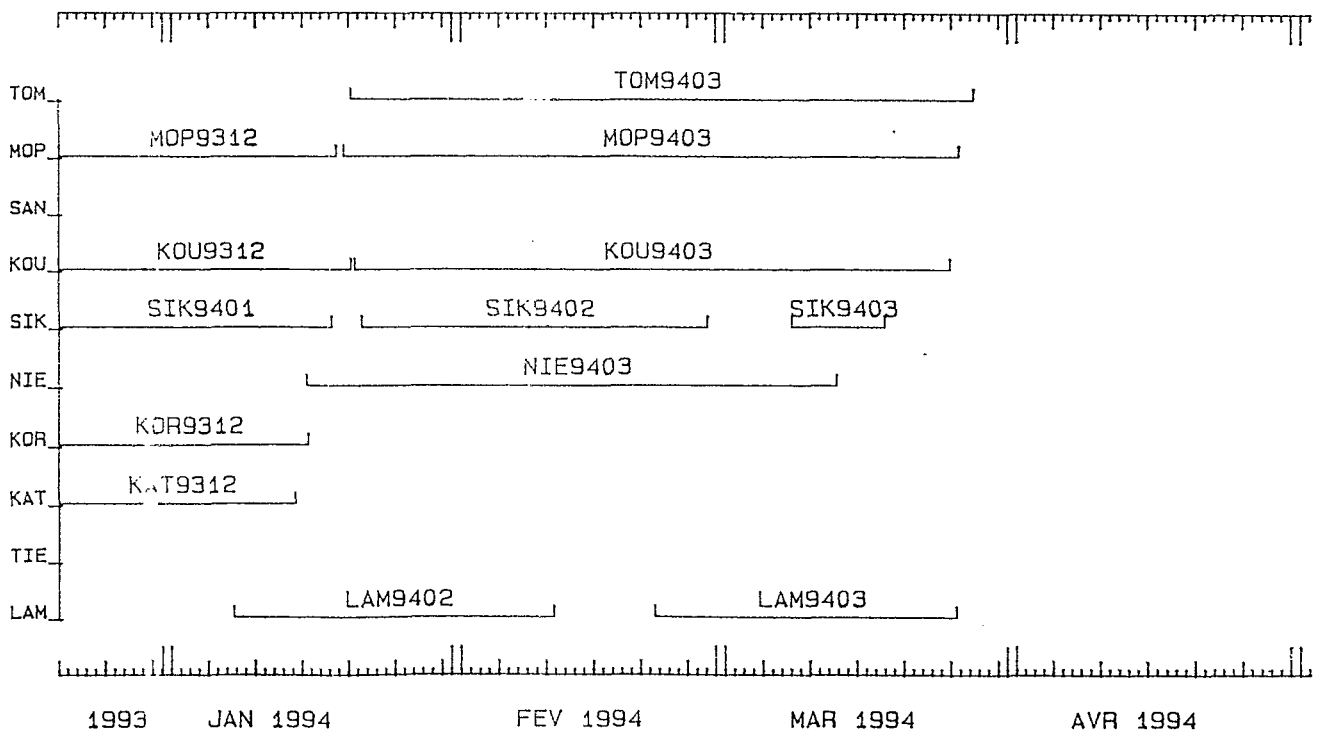


Figures 3a - visualisation des plages d'enregistrement aux stations avec les noms des fichiers de données.

CATALOGUE DES DONNEES MAGNETIQUES A.I.E.E. (suite2) 11



CATALOGUE DES DONNEES MAGNETIQUES A.I.E.E. (suite3)



Figures 3b - Visualisation des plages d'enregistrement aux stations avec les noms des fichiers de données.

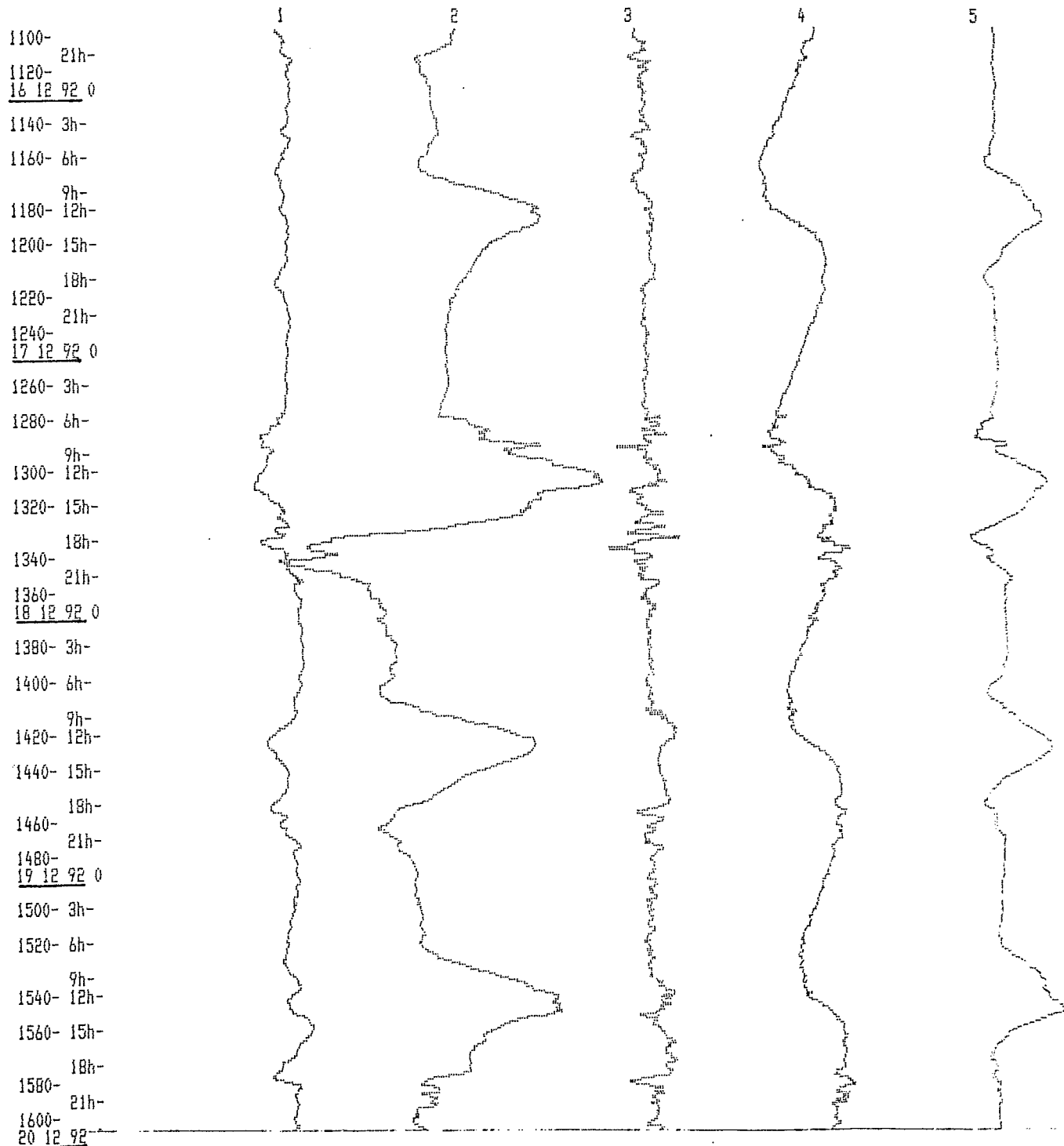
Station KORHOGO RAM 1024 koct
 Cad: 60 5 Voies, 7528 Blocs, Val.d'echel: 10 10 8 8 10
 Date debut: 6/12/92 15h12mn Date fin : 7/ 2/93 8h12mn

Notes: H hs le 16-01-93 0h

Trace blocs : 1100 a 1800 : Fichier moyenne sur 12 points.

V.e.graphe : 10 - voie 1 D = 46 nT/cm
 10 - voie 2 H = 46 nT/cm
 5 - voie 3 NS= 28.75 mV/km/cm
 5 - voie 4 EW= 28.75 mV/km/cm
 10 - voie 5 Z = 46 nT/cm

Blocs/heures sens + --->



1620-3h Figure 4 - Exemple d'enregistrement des valeurs minutes des 5
 1640-6h composantes magnéto-telluriques (D, H, NS, EO, Z) à
 9h la station de Korhogo du 16 au 20 décembre 1992.

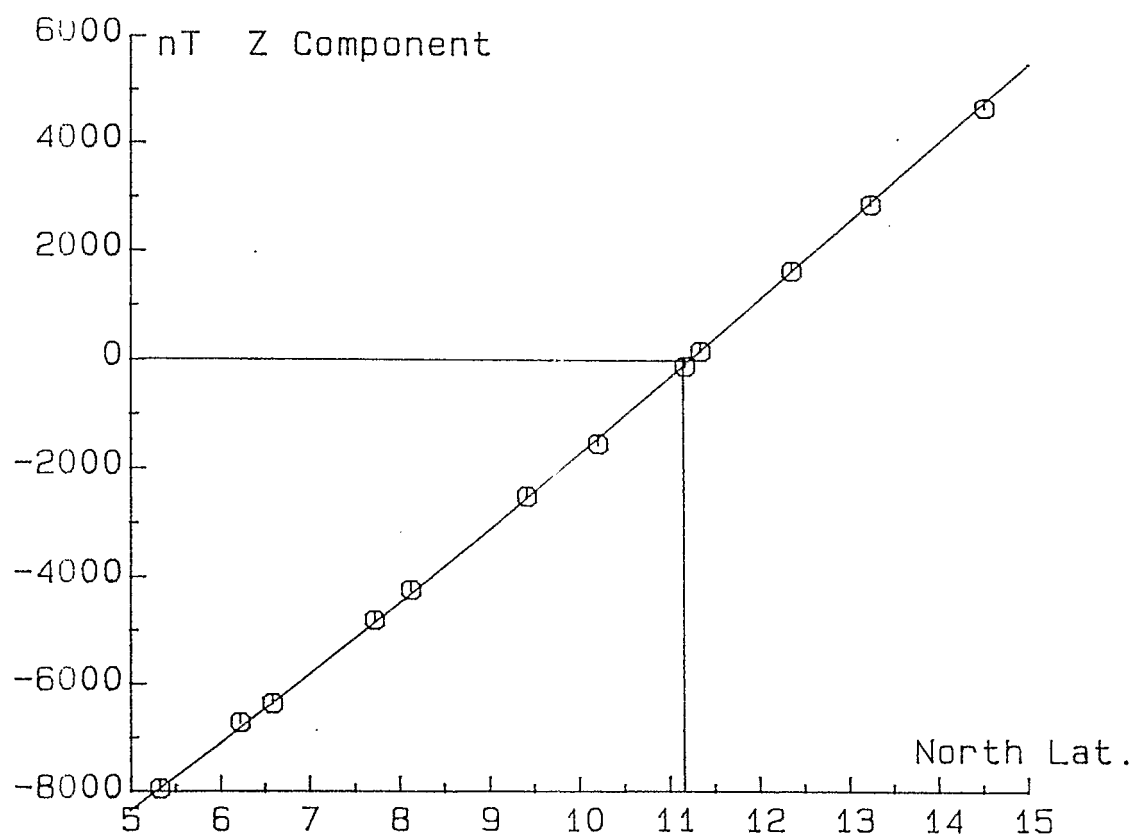
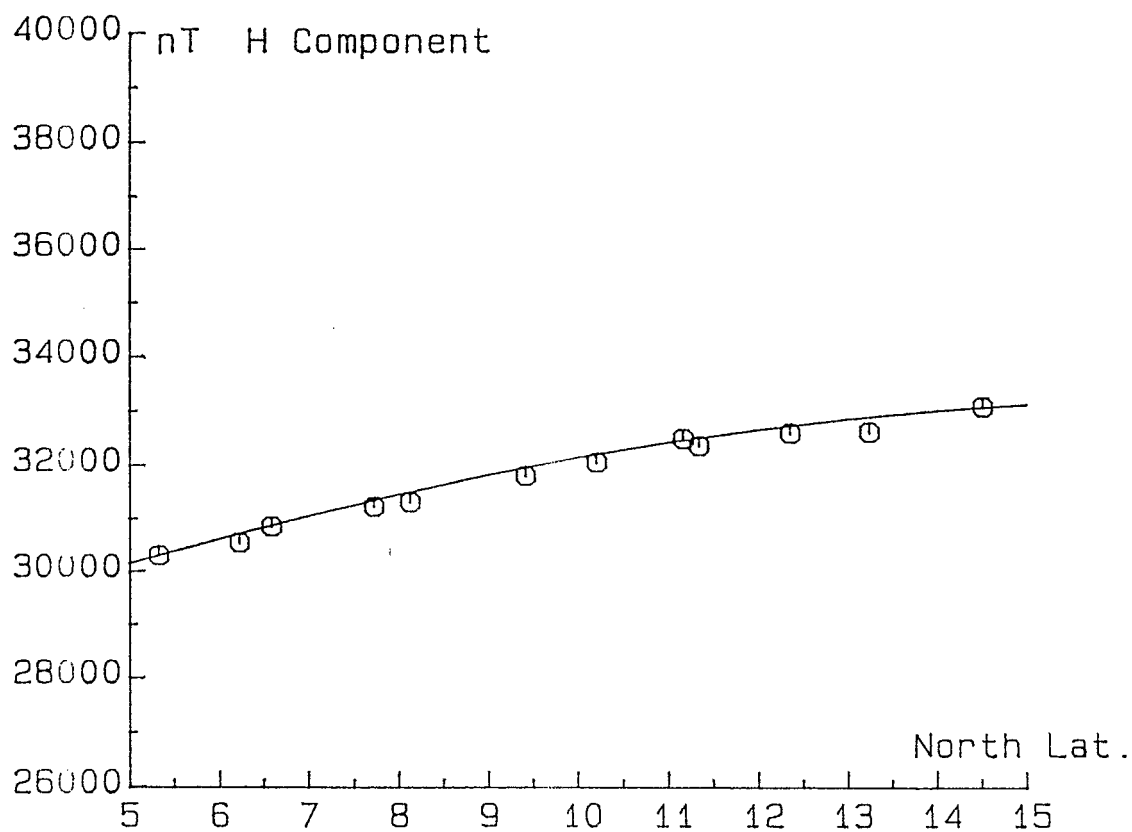


Figure 5 - Variations en latitude des composantes H et Z le long du profil (5° Ouest) du champ IGRF calculé (—) et des valeurs réelles mesurées (○). On a souligné sur la composante Z la position de l'équateur magnétique.

Année internationale de l'Electrojet Equatorial (AIEE)

Secteur Afrique

2ème Partie

Premiers résultats

Une première présentation de résultats a été faite au cours du congrès de l'IAGA, à Buenos-Aires (Argentine) en août 1993 (Amaury-Mazaudier et al., 1993, Doumouya et al., 1993, Boka et al., 1993). Il s'agissait de résultats préliminaires obtenus après analyse de quelques mois d'enregistrement.

2. Traitement et analyse des données

Les valeurs minutes permettent une étude fine des variations dues à l'EJ à une échelle temporelle réduite. Elles sont déjà utilisées pour l'étude de perturbations ionosphériques à courte longueur d'onde observées dans la couche F_2 par les sondeurs ionosphériques dans le cas de jours perturbés (orages magnétiques), (Vassal et al., 1994). La figure 4 donne un exemple de tracé des valeurs minutes.

Cependant dans ce rapport, nous nous intéresserons aux effets de la variation diurne sur les différentes composantes du champ magnéto-tellurique. Aussi notre étude portera sur les moyennes horaires calculées à partir des valeurs minutes.

2.1. Effets de l'EJ sur le champ tellurique.

Bien que les effets de l'électrojet équatorial sur les pulsations géomagnétiques aient été analysé (Sarma et al., 1979), il y a eu très peu d'études des variations diurnes du champ tellurique sous l'électrojet. De plus, elles ne concernaient souvent qu'une station (Hutton and Wright, 1961). Cependant, des estimations des effets internes de l'EJ ont été obtenues en séparant les contributions internes et externes sur le champ observé par l'opérateur K de Kertz (1954). Mais les conclusions sur les effets induits obtenus par cette séparation diffèrent suivant les auteurs. Forbush et Casaderve (1961) concluent à l'existence d'effets induits par l'EJ, contrairement à Fambitakoye (1976) qui arrive à des conclusions différentes.

La grande nouveauté de notre étude est que nous enregistrons les variations diurnes des courants telluriques en une chaîne de stations équatoriales, ce qui nous permet de vérifier l'éventuelle existence d'effets internes induits par l'EJ.

La carte de la figure 6 (d'après Le Page et Lécorché in Caruba et Dars, 1991) donne le contexte géologique du profil. Les 5 stations du sud (Côte d'Ivoire) sont situées sur le craton Ouest Africain affleurant, alors que pour stations du Mali on trouve un recouvrement du craton par les terrains sédimentaires du bassin de Taoudéni

On a tracé figure 7 la variation diurne pour le mois de janvier des composantes telluriques Nord-Sud (A), Est-Ouest (B) pour les stations du profil, ainsi que de la composante magnétique H (C) à Niellé, situé au maximum d'amplification de l'EJ.

Il apparait nettement, sur ces enregistrements, qu'il existe 2 types de variations très différentes: une variation très régulière, la variation de type S_R (variation journalière régulière) et des effets plus ou moins marqués d'induction dues aux perturbations, la variation de type D. Ces 2 types de variations semblent indépendantes de l'intensité de l'EJ.

2.1.1. La variation diurne de type S_R .

D'une station à l'autre, l'amplitude de cette variation est extrêmement changeante. Elle est importante (jusqu'à 50 mV/km) à Koutiala ou Sikasso, et est presque inexistante (à la limite de sensibilité de nos appareils) à San ou Niellé. A Tiebessou et Lamto, cette variation, très faible, est masquée par une forte amplification des perturbations de type D. L'amplitude de cette variation régulière dépend fortement des structures géologiques locales. Ainsi un terrain superficiel épais et très conducteur entraînera une forte atténuation de cette variation. Cela semble être le cas à San, Mopti ou Tombouctou (non tracé ici), situés en zone alluvionnaire.

Cette variation se caractérise cependant par une très grande régularité et semble indépendante de l'état de l'EJ. Les jours calmes (les 12-13/01, 21-24/01, 27-29/01/93, $\Sigma K_M < 20$) ou perturbés (les 10-11/01, 19/01, 25-26/01, 31/01/93, $\Sigma K_M > 30$), à fort ou faible électrojet, ne se différencient pas sur ces variations. En étudiant l'évolution temporelle de cette variation, on s'aperçoit qu'elle se modifie lentement suivant la saison, indépendamment de l'état de l'EJ, et semble donc étroitement liée aux changements saisonniers du S_R . D'autre part, on s'aperçoit qu'en cas d'orage magnétique intense, la variation tellurique S_R disparaît souvent et se rétablit après 4 ou 5 jours montrant par là qu'elle est étroitement liée à la configuration des nappes externes générales.

Il semble donc bien, comme le dit Fambitakoye, que ce soit la configuration du champ inducteur S_R externe par rapport au vecteur rotation terrestre, qui crée cette variation diurne.

2.1.2. Les variations de type D.

Les jours perturbés sont caractérisés par des variations rapides dans le temps (de périodes inférieures à quelques heures), de l'intensité du champ. On peut en voir des exemples les jours agités des 10-11/01, 19/01, 25-26/01, ou 31/01/93, ($\Sigma K_M > 30$) sur la figure 7, ou sur la figure 4 (le 17/12/92). La profondeur de pénétration de l'induction est alors beaucoup plus faible et l'intensité des courants induits dépend fortement de la géologie locale.

A Lamto et Tiebessou, l'amplitude des courants induits est importante les jours de forte agitation magnétique. Ces stations présentent une forte anisotropie tellurique due à la présence d'un réseau de failles important lié à la faille de Diombokro. Elle est beaucoup plus faible (d'un facteur 10 à 20) à Korhogo ou Niellé, et pratiquement imperceptible pour les stations au nord.

En conclusion, il semble bien que l'induction créée par l'EJ soit extrêmement faible, et que ses manifestations éventuelles sont soit masquées par la forte amplification des courants induits par les perturbations (Lamto et Tiebessou), soit noyées dans une variation diurne du S_R de grande amplitude (Sikasso ou Koutiala). En tout état de cause, la sensibilité de nos appareils ne permet pas la détection de cette induction.

2.2. La composante magnétique D.

Dans notre région d'étude, le champ magnétique est fortement polarisé dans la direction Nord-Sud. L'EJ (courants intenses Est-Ouest) amplifie encore cette polarisation en apportant une contribution principalement sur H. Il est donc normal que la contribution de l'EJ sur la composante D soit faible. On le vérifie, figure 8 où on a tracé, pour Janvier 1993, les variations diurnes de D aux stations du profil, ainsi qu'à l'observatoire de Tamanrasset (TAM), situé hors de l'électrojet (Latitude 22.13° Nord). Les variations, très similaires partout, reflètent la variation des nappes générales.

2.3. Les composantes magnétiques H et Z.

On a tracé figure 9, pour le mois de mars 1993, la variation journalière des moyennes horaires de Z (9a) et H (9b) en un certain nombre de stations du profil, ainsi qu'à Tamanrasset. L'influence de l'EJ apparaît nettement sur la composante Z (inversion du signal et extremums des amplitudes à Katiola et San) et sur la composante H (maximum d'amplification de la variation diurne à Niellé, centre du profil). La variation du niveau de nuit (importante sur H principalement), très similaires à toutes les stations du profil, ainsi qu'à Tamanrasset, reflète la variation générale du S_R .

Nos appareils ne donnent que des valeurs relatives du champ. Des mesures absolues n'ayant été faites qu'une fois à chaque stations au cours de la campagne de réoccupation de bases magnétiques, les recalages de niveau et la dérive instrumentale éventuelle de nos appareils ne nous permettent pas d'avoir les valeurs absolues du champ magnétique. Nous ne pouvons ainsi définir le S_R^P .

Aussi, pour l'analyse des effets de l'électrojet jour à jour sur les composantes H et Z, on ramène par différence, pour chaque station, les valeurs horaires du jour traité à un niveau de nuit défini par les valeurs 0h-1h des 2 nuits encadrant le jour, ce qui revient à linéariser le S_R à la station. Puis l'ensemble des données du réseau est normalisé par rapport à la station à l'extrémité du profil. On s'affranchit ainsi du S_R^P en ne laissant apparaître que l'effet de l'EJ seul

Puis on construit sur le profil une grille rectangulaire régulière (heures-latitudes) aux noeuds de laquelle les données horaires de tout le profil sont interpolées par une combinaison de Laplacien et de spline d'interpolation. Le jeu de données ainsi traité permet de tracer les profils horaires, ou la cartographie des composantes, mettant en évidence la contribution de l'EJ au S_R , et de définir les divers paramètres de l'EJ: position, intensité, largeur etc...

Les caractéristiques moyennes de l'EJ et des contre-électrojets (CEJ) pour les jours calmes ont été étudiées en utilisant les données d'observatoires à diverses longitudes (Marriot et al., 1979): variations saisonnières, effet du cycle solaire, marée lunaire semi-diurne. Des observations de dissymétrie de l'anomalie ionosphérique équatoriale à l'aide d'un réseau d'ionosondes dans l'est asiatique ont aussi été faites (Walker et al., 1991). Mais notre réseau dense de stations équatoriales recouvrant à une même longitude les parties nord et sud de l'EJ nous permet d'étudier les variations fines de ces paramètres.

2.3.1. La composante H - Centre et intensité de l'EJ.

La figure 10 donne un exemple de tracé des profils horaires et de cartographie de H (l'équidistance des courbes iso-valeurs est de 10 nT) pour un jour calme, le 24 Février 1993 ($\Sigma K_M=9$), avec un électrojet moyen, régulier, symétrique, et en l'absence de contre-électrojet. Pour les profils horaires, en plus de nos stations ($n^{\circ} 1$ à 10), on a traité les données de Tamanrasset ($n^{\circ} 0$) situé hors de l'EJ à 22.13° nord. On s'aperçoit que la station de Tombouctou ($n^{\circ} 1$) est au même niveau que Tamanrasset aux heures d'amplification de l'EJ, montrant qu'elle n'est plus soumise à l'EJ. Le profil, au moins pour sa partie nord, englobe tout l'EJ.

La position au sol du centre de l'électrojet peut être définie, sur la carte iso-H, par le maximum de H, correspondant à l'heure du maximum d'amplification de l'électrojet, la valeur de ce maximum nous donnant une indication relative sur l'intensité de l'électrojet. Nous avons calculés ces paramètres pour l'année 1993 en traitant les jours magnétiques calmes ($\Sigma K_M < 20$).

La position moyenne du centre de l'électrojet pour 1993 reste très stable. On trouve une position du centre (H maximum) à $10.85^{\circ} \pm 0.35^{\circ}$ Nord. Cette position est à comparer à la position de l'équateur magnétique (paragraphe 1.5.2.) à 11.20° Nord sur le méridien 5° ouest. Le modèle IGRF donnant, comme nous l'avons vu dans la 1er partie, une très bonne approximation du champ en Afrique de l'ouest, si l'on calcule la position de l'équateur à 105 km d'altitude (altitude de l'EJ) on obtient une localisation de l'équateur magnétique à 10.90° nord correspondant bien à la position au sol du centre de l'électrojet. Le plan équatorial est incliné et l'effet maximum de l'EJ au sol se situe à la verticale de l'EJ centré sur l'équateur magnétique, à 105 km d'altitude, et non sur l'équateur au sol

L'EJ étant centré sur l'équateur magnétique, son centre suit le déplacement vers le nord de cet équateur, lié à la lente dérive générale du champ (Vassal, 1990). Ainsi, en décembre 1992 on trouve une position moyenne du centre de l'EJ à $10.73^{\circ} \pm 0.14^{\circ}$, et en avril 1994, soit 16 mois plus tard, le centre est à $10.87^{\circ} \pm 0.05^{\circ}$, soit une dérive vers le nord de 0.14° , ou 15 km.

L'intensité de l'EJ est très variable d'un jour à l'autre, pouvant passer de 50 nT à 150 nT (Elle est de 129 nT le 24-02-93). Elle semble soumise à des variations saisonnières, étant en moyenne plus importante aux équinoxes qu'aux solstices, bien que cet effet soit masqué par la très grande variabilité jour à jour de cette intensité. L'amplification due à l'EJ, qui est en moyenne 1.3 et peut atteindre certains jours un facteur 2, se manifeste aussi bien sur la variation diurne des jours calmes que sur les perturbations.

Les variations de H le long du profil étant régulières, on détermine très bien le centre et l'intensité de l'EJ en ne traitant que trois stations bien réparties: Korhogo, Sikasso et San.

2.3.2. La composante verticale Z - Dissymétries Nord-Sud.

C'est sur la composante magnétique verticale Z qu'apparaît le plus nettement les effets saisonniers de dissymétrie nord-sud ainsi que les variations de largeur de l'EJ. Les données sont traitées de la même manière que pour H.

Sur la figure 11, similaire pour Z à la figure 10, on constate que la partie nord du profil recouvre bien l'EJ. Par contre au sud, nous ne retrouvons pas le niveau d'amplitude moyen hors électrojet.

La carte (L'équidistance des courbes est ici de 5 nT) permet de déterminer la largeur de l'EJ définie par la distance entre les 2 foyers sud (+) et nord (-) des courbes. On trouve, pour le 24 février 1993, une largeur de 6.6° , soit 725 km. Les foyers sont symétrique par rapport au centre, d'intensité -55 nT pour le foyer nord et +49 nT pour le foyer sud.

La largeur de l'EJ, ainsi que la valeur absolue de l'intensité des foyers varient fortement suivant la saison. En été boréal, le foyer nord est beaucoup plus intense que le foyer sud (29-06-93, -60 nT et +40 nT) cette configuration s'inversant l'hiver (25-02-93 12h, -40nT et +70 nT).

2.4. Le contre-électrojet.

Le contre-électrojet (CEJ) s'identifie par une inversion des courbes de profil horaires à certaines heures. Il peut être créé par un ruban de courant de sens inverse à celui de l'EJ. Ses manifestations fréquentes sont extrêmement variables. Il peut se produire le matin, l'après-midi, ou se manifester toute la journée. Il peut n'être présent qu'au nord, ou au sud de l'équateur. Sa présence affecte les paramètres de l'EJ: atténuation des effets magnétiques, déplacement apparent de l'heure ou de la position du centre (sur H) et des foyers (sur Z). On a tracé, figure 13, différents jours calmes de morphologies variées sur Z, montrant les effets du CEJ:

Le 5 octobre 1993 ($\Sigma K_M=10$), EJ régulier et symétrique, pas de CEJ.

Le 21 octobre 1993 ($\Sigma K_M=10$), CEJ le matin sensible au nord du profil (foyer positif de 15 nT vers 7h30).

Le 22 novembre 1993 ($\Sigma K_M=11$), CEJ l'après-midi important au sud, foyer négatif de 20 nT vers 16h.

Le 15 juin 1993 ($\Sigma K_M=9$), présence de CEJ toute la journée, (foyers positifs de 5 nT au nord à 7h et 16h) avec forte atténuation du champ à 12h.

3. Conclusion.

Après la présentation de notre dispositif d'étude de l'électrojet équatorial, nous avons montré dans ce rapport comment obtenir les principales caractéristiques locales de l'EJ déduites des données obtenues aux stations du réseau: effets sur le champ tellurique, morphologie des composantes magnétiques, effets saisonniers etc..

Une étude complète de l'EJ en tant que partie d'un circuit électrique global à l'échelle planétaire nécessite d'intégrer nos données dans un cadre plus général, en utilisant les données de nombreuses autres sources: observatoires mondiaux, données AIEE des autres secteurs d'étude (Amérique, Asie), données satellite.

De même, pour la compréhension des phénomènes ionosphériques à plus courte longueur d'onde, nous aurons besoin des données obtenus par les sondeurs, radars et interféromètres mis en oeuvre pour l'AIEE.

Ce rapport d'étape est donc le point de départ d'études plus complètes qui ont déjà commencées en collaboration avec des chercheurs travaillant sur l'EJ.

Remerciements:

Ce projet a pu se concrétiser grâce à l'efficacité du comité français pour l'AIEE, et en particulier de son président M. Ousseini Fambitakoye et de sa secrétaire scientifique Mme Christine Amaury-Mazaudier. Le support financier de l'ORSTOM a permis l'acquisition de l'équipement et la maintenance du réseau pendant 2 ans. Le ministère français de la coopération, par le biais d'un projet CAMPUS avec l'université d'Abidjan, a participé au financement de cette opération, en particulier en finançant la formation des étudiants travaillant sur les données acquises.

Références

- Amory-Mazaudier C., J. Achache, A. Achy-Séka, Y. Albouy, E. Blanc, K. Boka, J. Bouvet, Y. Cohen, C-S. Diatta, V. Doumouya, O. Fambitakoye, R. Gendrin, C. Goutelard, M. Hamoudi, R. Hanbaba, E. Hougninou, C. Huc, K. Kakou, A. Koba Toka, P. Lassudrie-Duchêne, E. Mbipom, M. Menvielle, S.O. Ogunade, J.O. Oyinloye, D. Rees, A. Richmond, E. Sambou, E. Schmucker, J.L. Tireford, J. Vassal, P. Vila, 1993, International Equatorial Electrojet year: The African Sector, à paraître dans la revue *Revista Brasileira de Geofísica*.
- Bessoles, B., 1977, Géologie de l'Afrique, le craton Ouest Africain, *Mémoires n°88, Editions du BRGM, Paris*.
- Boka, K, J. Vassal, M. Menvielle, O. Fambitakoye and Y. Cohen, 1993, A first description of the variations in telluric potentials associated to the equatorial electrojet at african longitudes, Congrès de l'IAGA, Buenos-Aires, Argentine.
- Caruba R. et R. Dars, 1991, Géologie de la Mauritanie, Ouvrage collectif, Université de Nice-Sophia Antipolis, CRDP de Nice.
- Doumouya, V., J. Vassal, Y. Cohen, O. Fambitakoye and M. Menvielle, 1993, The equatorial electrojet at african longitudes: preliminary results from magnetic measurements, Congrès de l'IAGA, Buenos-Aires, Argentine.
- Fambitakoye, O., 1976, Etude des effets magnétiques de l'électrojet équatorial, *Géophysique 14, ORSTOM, Paris, Thèse*.
- Forbush, S.E. and M. Casaverde, 1961, The equatorial electrojet in Peru, *Carnegie Inst. Wash.*, Publ. 620.
- Hutton, R and R.W.H. Wright, 1961, Diurnal variation of earth currents at the equator, *J. atmos. terr. Phys.*, **20**, 100-109.
- Kertz, W. 1954, Modelle für erdmagnetisch induzierte elektrische Strome im Untergrund, *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen*, **5**, Math.-Physk., K1 101-110.
- Langel, R.A., 1992, International geomagnetic Reference Field, 1991 revision: International Association of Geomagnetism and Aeronomie (IAGA) Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation, *Phys. Earth Planet. Int.*, **70**, 1-6.
- Marriott R.T., A.D. Richmond and S.V. Venkateswaran, 1979, The Quiet-Time Equatorial Electrojet and Counter-Electrojet, *J. Geomag. Geoelectr.*, **31**, 311-340.
- Sarma, Y.S., T.S. Sastry and S.V. Sarma, 1979, Equatorial Electrojet Effects on Geomagnetic Pulsations, *indian J. Radio and Space Phys*, **8**, 249.

- Vassal, J., 1987, Secular change in the geomagnetic field in West Africa for thirty years: comparison with fourth generation IGRF models, *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 699-707.
- Vassal, J., 1990, The Drift of Geomagnetic Equator in West Africa from 1913 to 1986, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 951-958.
- Vassal J. et D. Dukhan, 1993, Année internationale de l'Electrojet Equatorial (AIEE), Mesures Magnétiques, Logiciel 'AIEE' de traitement de la base de donnée, ORSTOM, Dakar, 23 p. multigr.
- Vassal, J., R. Foy, C. Villeneuve and M. Dukhan, 1993, Regional magnetic repeat station network description - West Africa 1992-1993, ORSTOM, Dakar, 36 p. multigr.
- Vassal, J., Dukhan, M., O. Fambitakoye, V. Doumouya, K. Boka, R. Hanbaba, J. Henry, E. Kone, A. Koba, B.E. Hounninou, R. Fleury and P.M. Vila, Equatorial West African Ionosphere New Results 5° West Longitude, Nov. 1992 to July 1993, Symposium S.T.P. de Sendai, Japon, Juin 1994, en préparation.
- Walker, G.O., T.Y.Y. Li, J. Soegijo, T. Kikuchi, Y.N. Huang, V. Badillo, and E.P. Szuszczewicz, 1991, North-south asymmetry of the equatorial ionospheric anomaly observed in East Asia during the SUNDIAL-87 campaign, *Ann. Geophysicae*, **9**, 393-400.

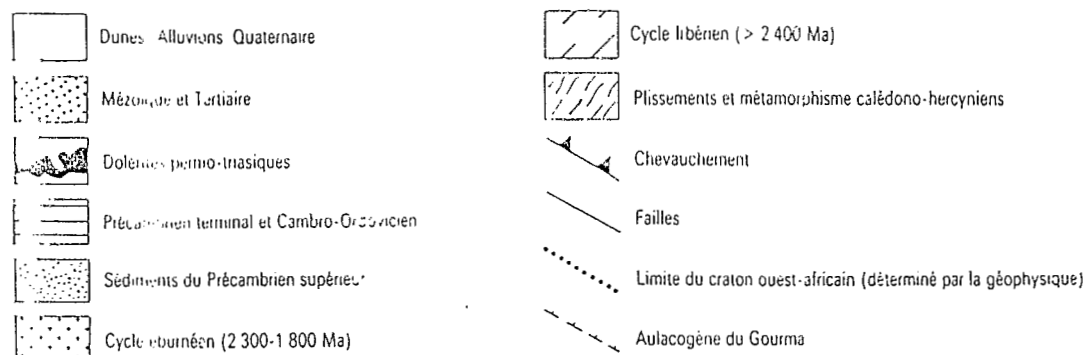
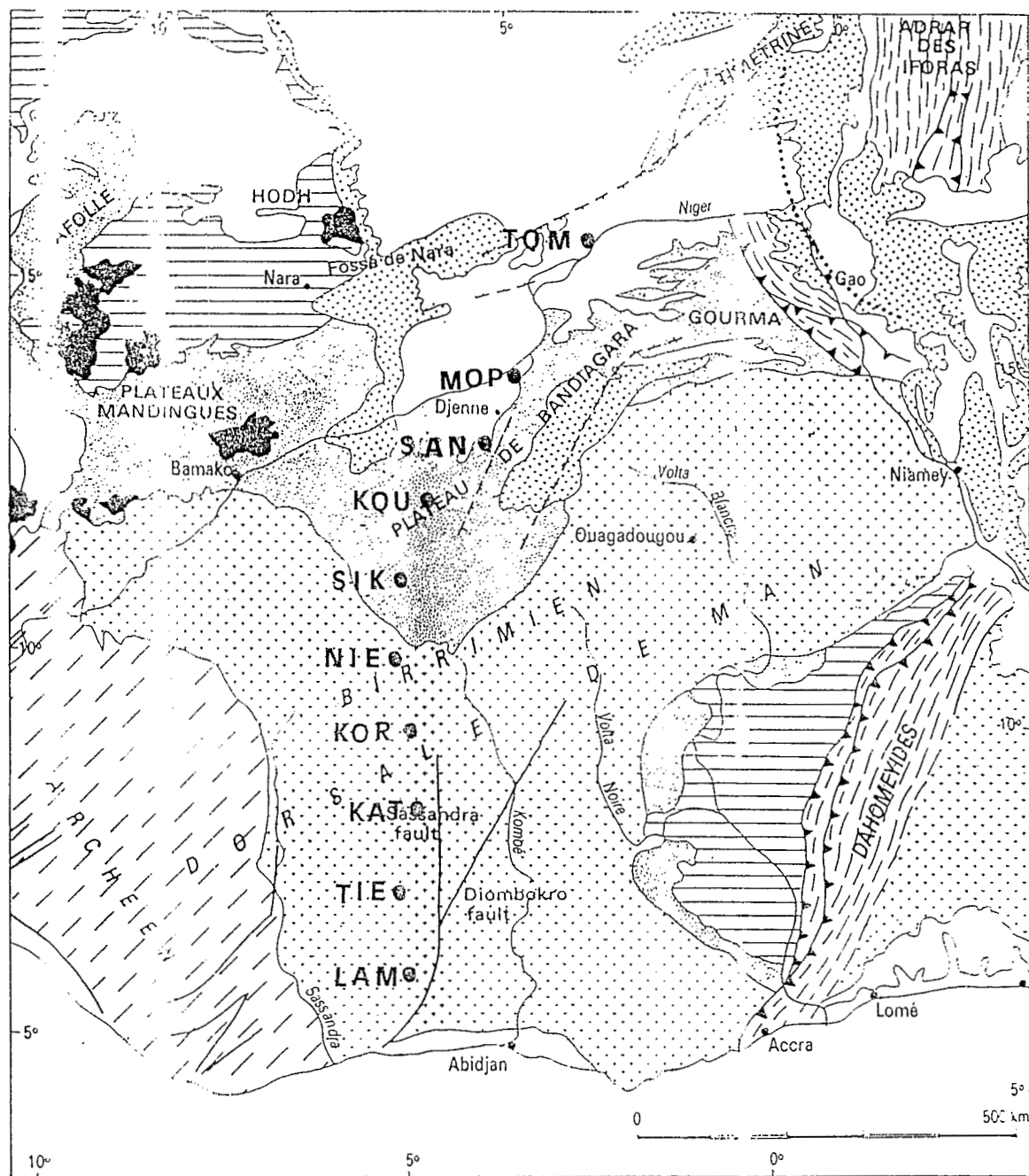
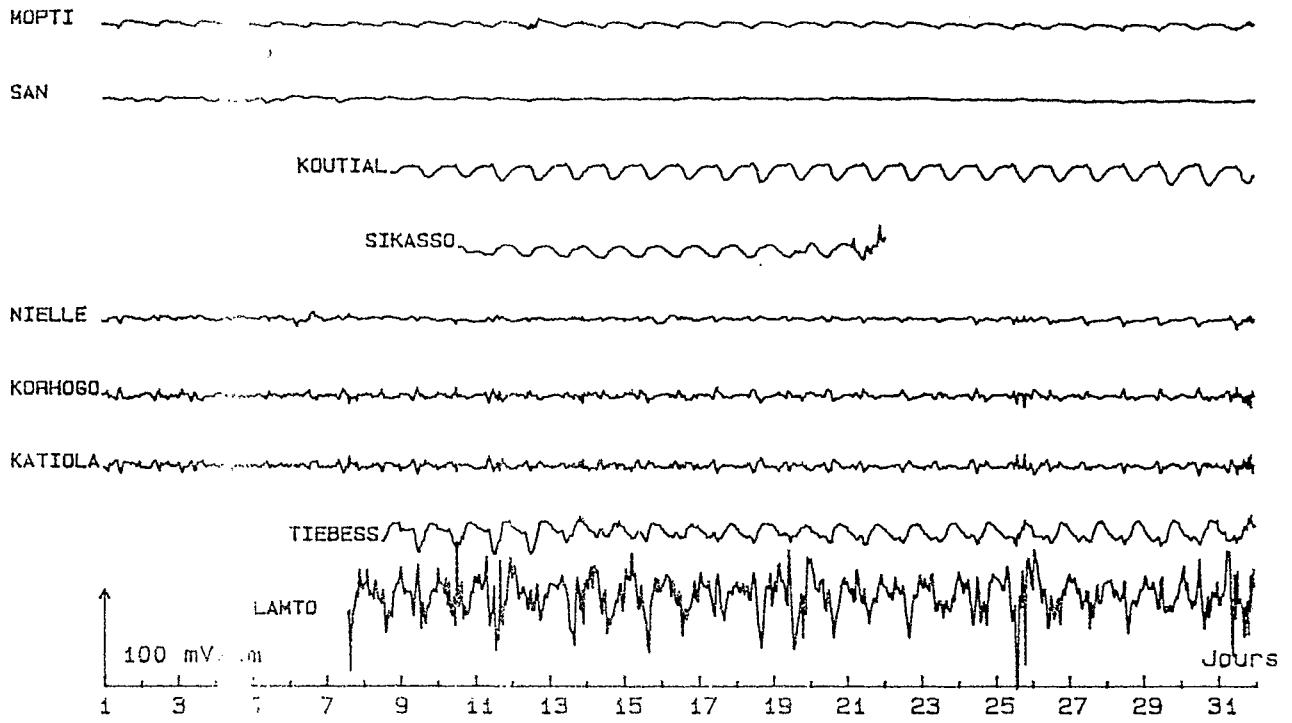
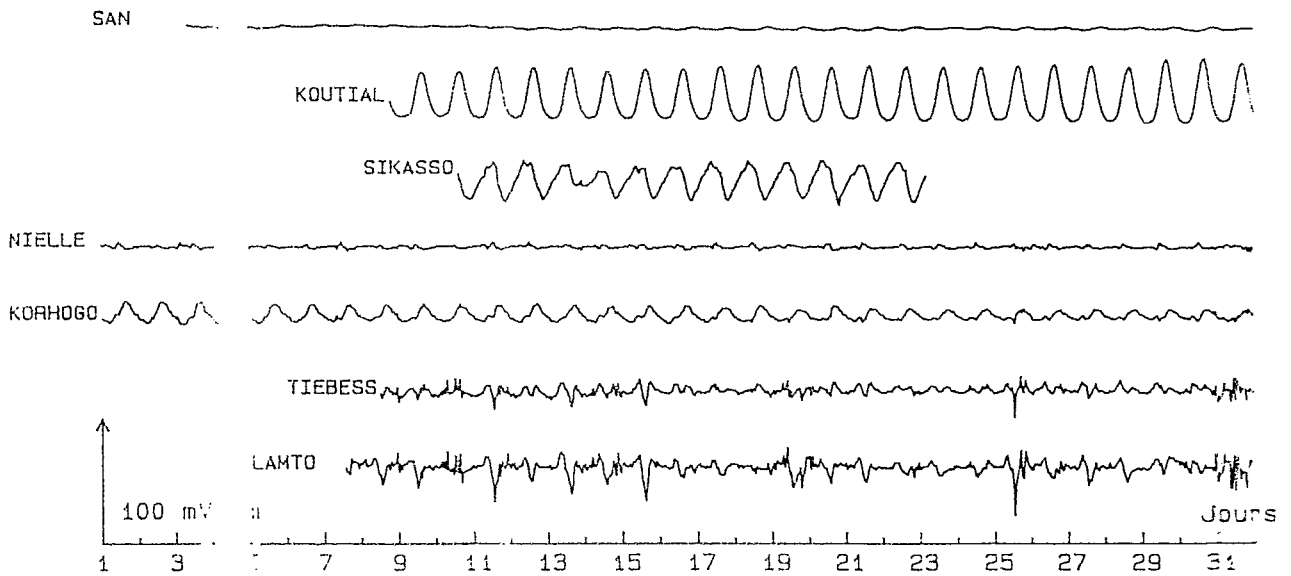


Figure 6 - Le profil AIEE dans son contexte géologique (D'après LePage et Lécorché, in "Géologie de la Mauritanie", Caruba et Dars, 1991).

A JANVIER 1993 -NS- Variations journalieres 23



B JANVIER 1993 -EO- Variations journalieres



C JANVIER 1993 -H- Variations journalieres

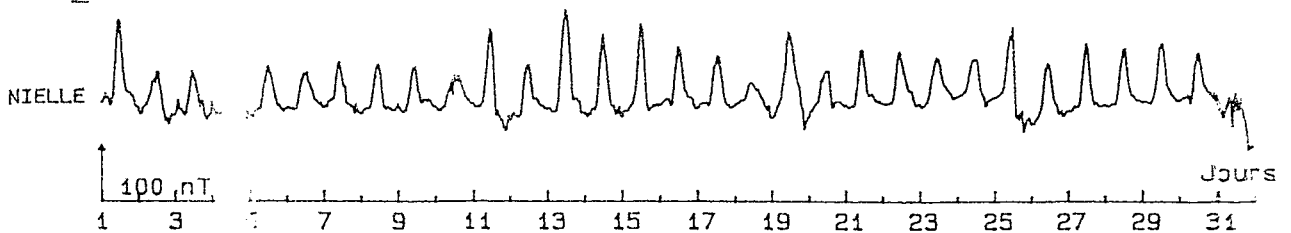


Figure 7 - Variation diurne pour le mois de janvier des composantes N-S (A), E-O (B) pour les stations du profil, et de la composante H (C) à Niellé.

JANVIER 1993 -D- Variations journalieres

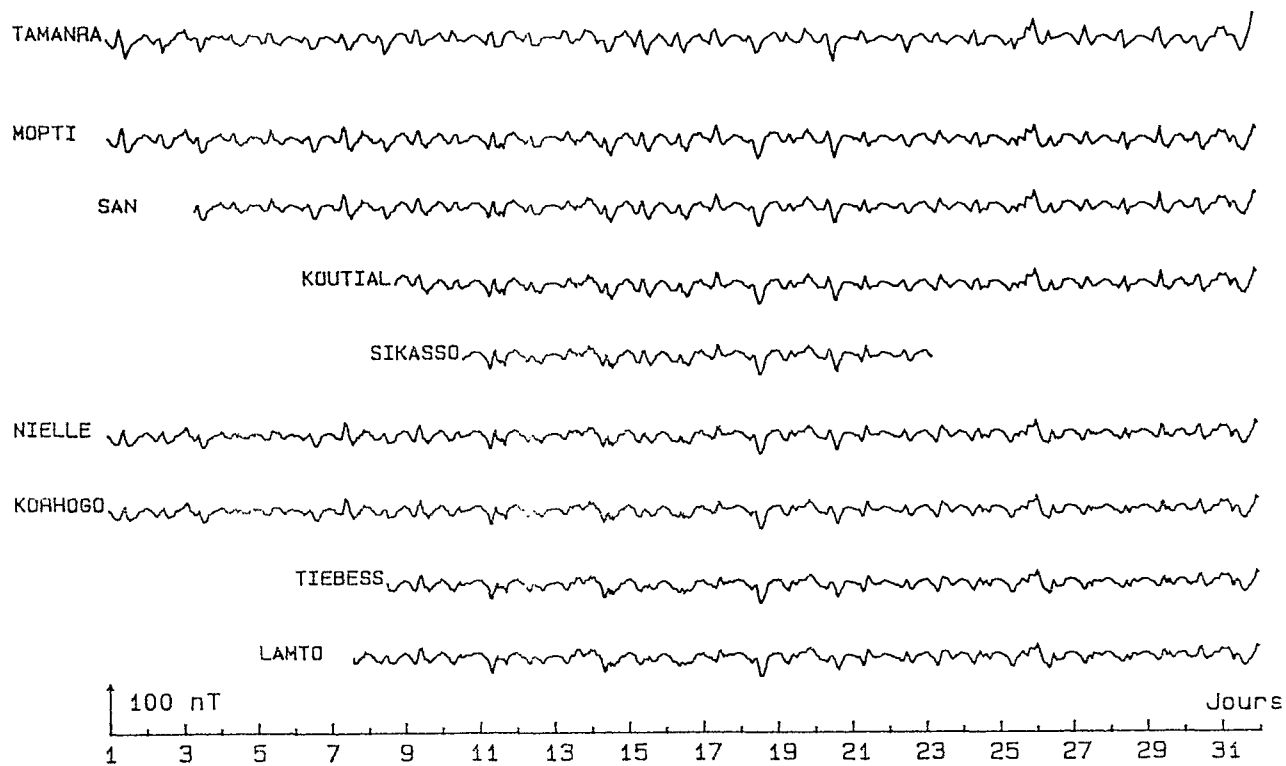
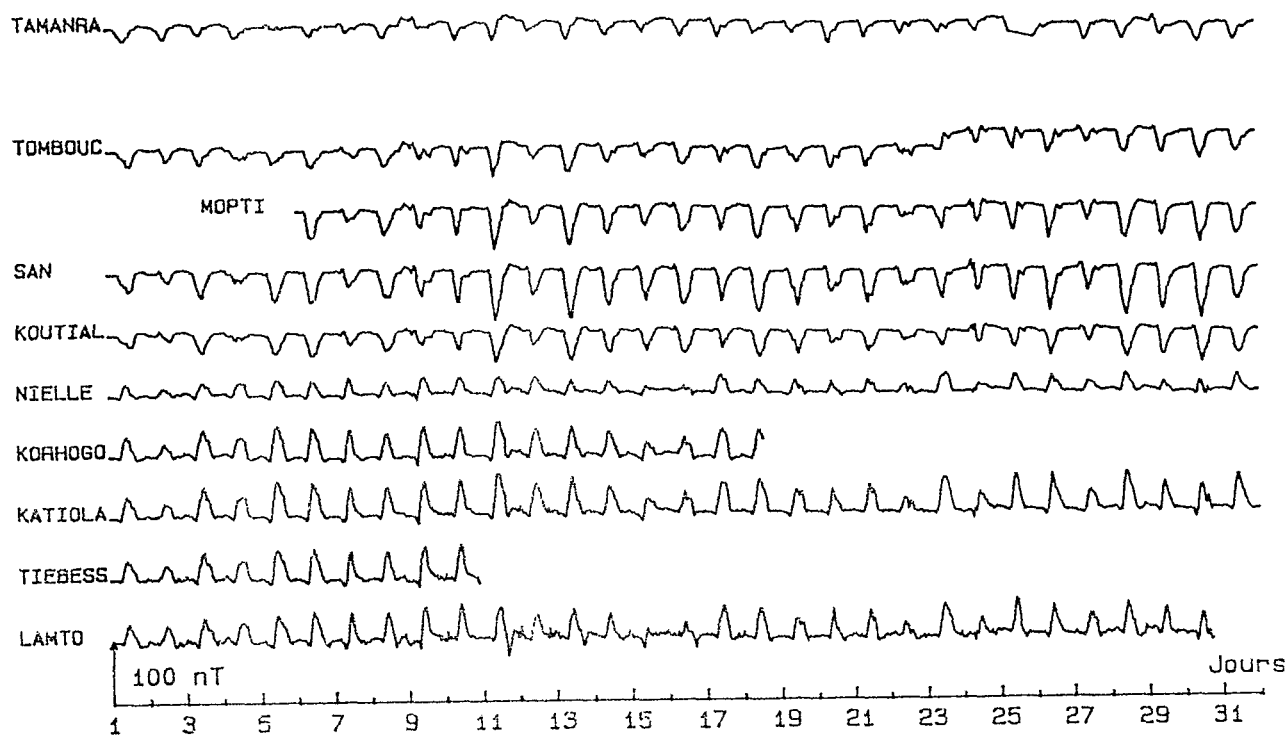


Figure 8 - La variation diurne de D aux stations du profil, ainsi qu'à l'observatoire de Tamanrasset (TAM) pour Janvier 1993

MARS 1993 -Z- Variations journalieres **A**



MARS 1993 -H- Variations journalieres **B**

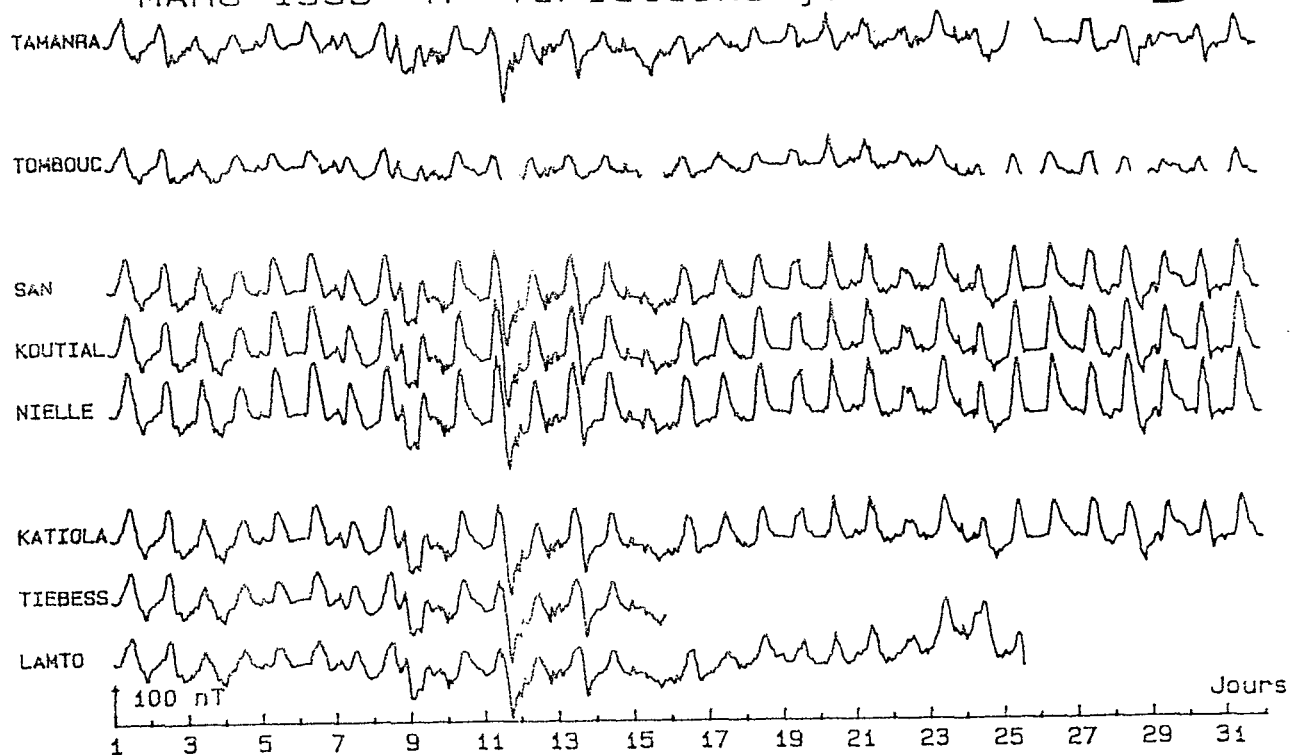


Figure 9 - Variation journalière pour le mois de mars 1993, des moyennes horaires de Z (9a) et H (9b) aux stations du profil, ainsi qu'à Tamanrasset.

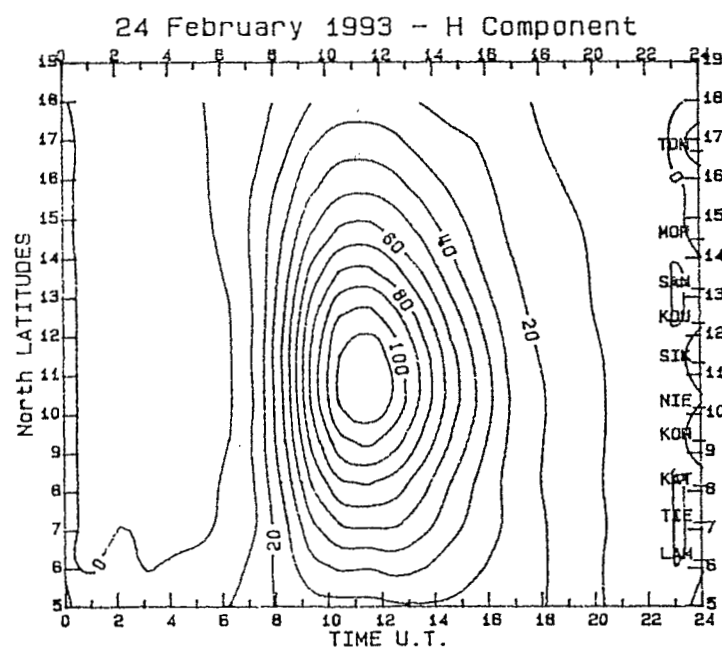
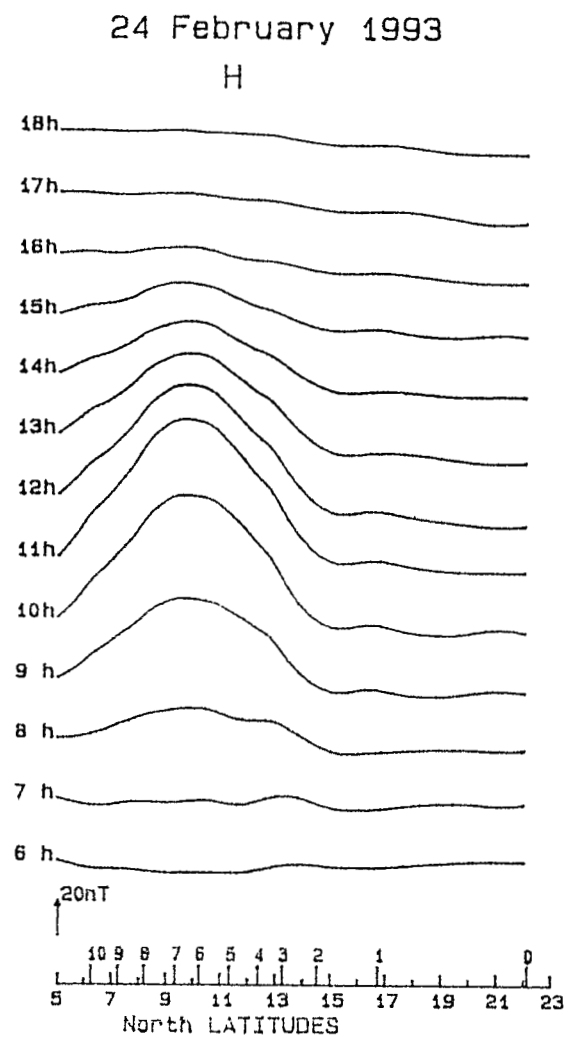


Figure 10 - Exemple de tracé des profils horaires et de cartographie de H (l'équidistance des courbes iso-valeurs est de 10 nT)

24 February 1993

Z

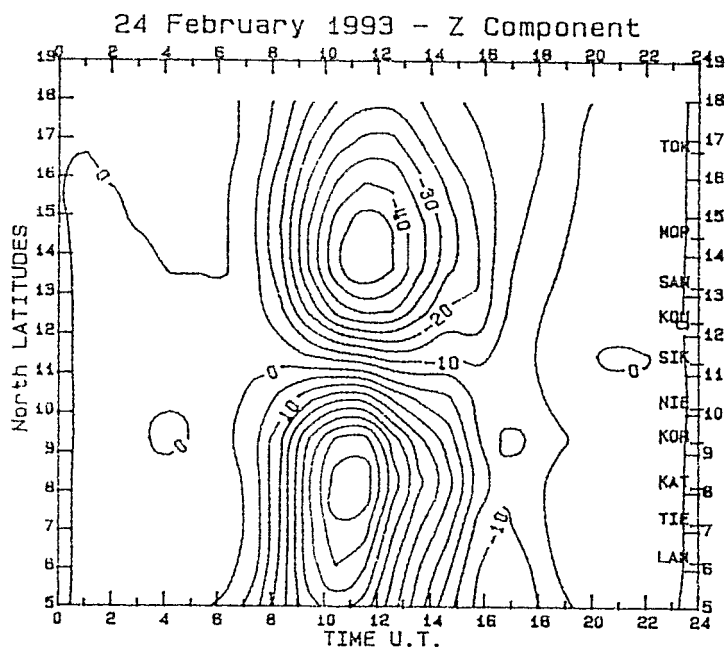
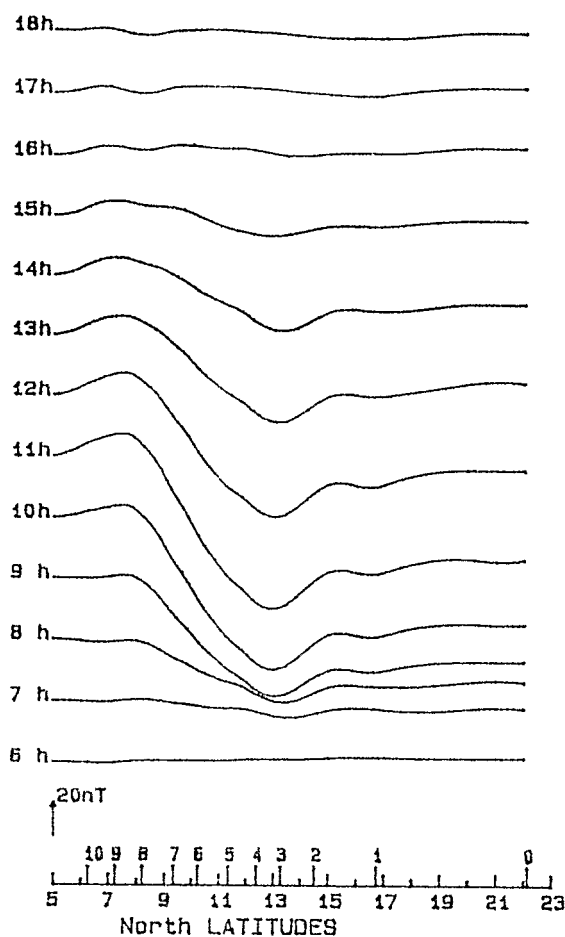


Figure 11 - Exemple de tracé des profils horaires et de cartographie de Z (l'équidistance des courbes iso-valeurs est de 5 nT)

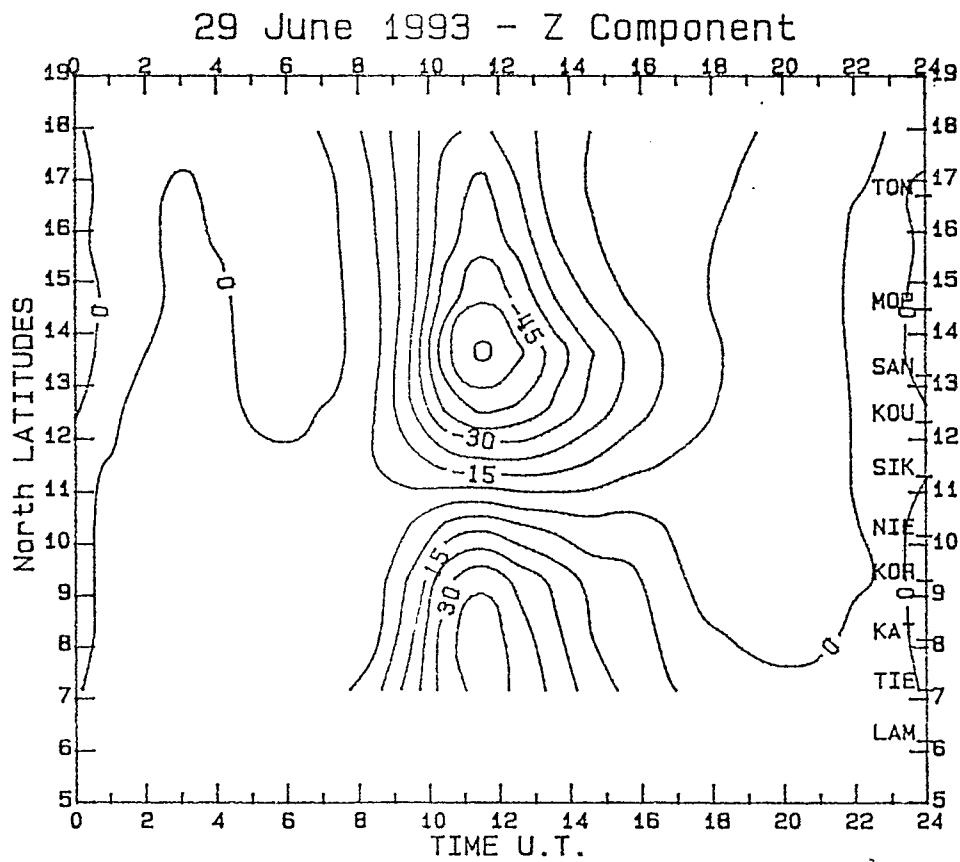
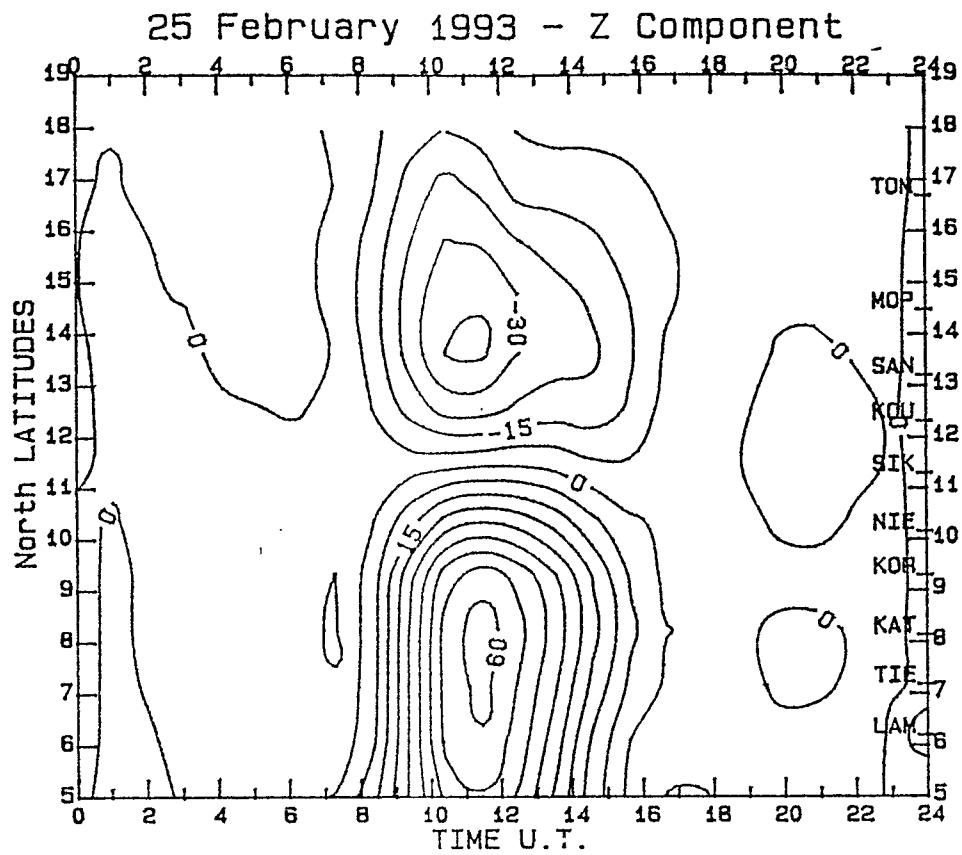


Figure 12 - Effet saisonnier sur la composante Z (l'équidistance des courbes iso-valeur est de 5 nT)

Figure 13 - Cartographie de différents jours calmes sur la composante Z, montrant les effets du CEJ:

