

CARTOGRAPHIE D'UNITÉS HYDROLOGIQUES HOMOGÈNES ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE, EXEMPLE DE L'EXPÉRIENCE HAPEX-SAHEL

M. ESTEVES¹

RÉSUMÉ

Une approche cartographique à différentes échelles, basée sur un découpage de l'espace en unités hydrologiques, est proposée. Les principes sur lesquels reposent cette méthode sont présentés et illustrés à partir des exemples choisis sur le bassin versant de Sama Dey et le site central est. Des indications sont fournies sur l'aptitude de ces unités à produire du ruissellement. Il ressort de l'analyse de ces deux cartes que les écoulements de surface jouent un rôle négligeable à l'échelle régionale.

¹Représentation Orstom au Niger, B.P. 11416, Niamey, Niger.

POSITION DU PROBLÈME

Dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel 92 (GOUTORBE *et al.*, 1992), des études sont menées sur les écoulements de surface sur le *site central est*. Deux thèmes sont abordés : le premier traite de l'analyse des conditions de production du ruissellement et le second de l'étude du rôle des écoulements de surface sur la redistribution de la pluie. Cela se fait à quatre échelles spatiales : la parcelle (100 m²), le versant (<1 km²), le bassin versant (< 10 km²) et la région (400 km²).

L'expérimentation de terrain a pour but de caractériser les processus et les unités hydrologiques élémentaires identifiées comme étant des portions actives de l'espace hydrologique vis-à-vis des écoulements de surface. Elle ne permet l'accès qu'aux trois premières échelles et la difficulté tient à la transposition de cette connaissance pour caractériser les fonctionnements à une échelle qui n'est pas accessible à l'instrumentation. Pour résoudre ce problème nous proposons l'utilisation de l'approche cartographique.

LE PAYSAGE DU SITE CENTRAL EST

Le relief du *site central est* est très peu marqué et l'amplitude de la dénivelée est partout inférieure à 60 mètres. Le paysage est dominé par des plateaux cuirassés, morcelés, aux talus souvent marqués et qui surplombent d'une trentaine de mètres de larges dépressions. Ces dernières se recourent et donnent l'impression de vallées continues disposées suivant une géométrie polygonale. Le paysage actuel est le résultat d'une longue histoire géologique entamée à l'aire primaire et qui s'est poursuivie jusqu'au quaternaire avec les importants dépôts éoliens de sables. La similitude de certaines formes de relief fait penser au modèle des régions calcaires et au rôle tenu par la dissolution et l'érosion dans la genèse des dépressions plus ou moins fermées, que l'on peut observer sur l'ensemble du *site central est* (ESTÈVES et LENOIR, 1994).

L'hydrographie de cette région est remarquable par l'absence de réseaux hydrographiques organisés et par la petite taille des bassins versants (quelques kilomètres carrés pour les plus grands). En effet, les cours d'eau prennent naissance en bordure des reliefs (plateaux, buttes) et disparaissent à la faveur de la première rupture de pente importante. Les écoulements sont sporadiques et cessent avec la fin de la pluie qui leur a donné naissance. Les plus importants peuvent, soit atteindre le fond d'une dépression dans laquelle ils s'infiltreront rapidement, soit disparaître dans les bas-fond à travers le lit des cours d'eau. Il peut néanmoins subsister un peu d'eau dans des creux topographiques dont le fond est colmaté (mares). La tendance générale est à la dégradation du réseau hydrographique et à l'endoréisme.

LA DÉMARCHE CARTOGRAPHIQUE : OUTIL DE DESCRIPTION ET D'INTÉGRATION SPATIALE

La principale difficulté que l'on rencontre vient de la définition de la notion d'« unité hydrologique ». La définition que l'on peut donner est : *portion de l'espace dont la réponse hydrologique est homogène vis-à-vis des sollicitations extérieures* ; dans notre cas celles-ci sont essentiellement dues à la pluie. Dans la nature, aucune aire n'est jamais totalement homogène, elle ne l'est qu'en fonction d'un certain point de vue et d'une certaine échelle. Si à l'échelle du *site central* est un glacis versant semble homogène, il ne l'est plus à celle du versant puisqu'une mosaïque de surfaces apparaît avec des zones de sol nu, ou cultivées ou en jachères. À cette échelle, une jachère peut être figurée comme une unité sur une carte des unités hydrologiques à l'échelle du 1/20 000. L'observation détaillée sur le terrain met en évidence des organisations pelliculaires superficielles (croûtes) de nature différente qui favorisent ou non la production de ruissellement. Il est donc nécessaire de dégager les aspects généraux qui confèrent l'homogénéité de chaque unité. Il est bien évident que ces aspects communs recouvrent des éléments d'hétérogénéité. L'homogénéité interne des unités cartographiques varie en fonction de l'échelle du levé. Il faut donc que les critères d'homogénéité soient appropriés à l'échelle adoptée pour la représentation cartographique, c'est-à-dire qu'ils correspondent au niveau taxonomique que l'échelle de la carte permet de représenter. Vouloir faire apparaître l'influence de l'hétérogénéité des organisations pelliculaires superficielles sur une carte au 1/20 000 est une erreur. À l'inverse conserver sur le plan au 1/100 d'une parcelle de ruissellement la jachère comme une unité homogène, est également une erreur.

La cartographie des unités hydrologiques doit s'appuyer sur des levés détaillés, réalisés indépendamment de toute hypothèse de regroupement pour une représentation aux échelles plus petites. C'est à partir de ces résultats que se fait la détermination des critères de regroupement.

L'approche cartographique constitue donc la première étape de l'étude hydrologique d'une région. La cartographie des unités hydrologiques fournit les éléments qui vont permettre un découpage de l'espace aux différentes échelles. C'est à l'issue de cette étape que les dispositifs expérimentaux sont définis pour caractériser chaque unité et que les modèles de représentation sont développés.

CARTOGRAPHIE DES UNITÉS HYDROLOGIQUES À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT : EXEMPLE DE SAMA DEY

Il est établi depuis de nombreuses années que la variabilité spatiale de la production du ruissellement en région semi-aride est due à la végétation et aux caractéristiques de la surface du sol. De nombreux travaux réalisés en Afrique de l'ouest l'ont confirmé pour le Sahel (COLLINET et VALENTIN, 1979 ; ALBERGEL, 1988), et ont abouti à la notion d'*état de surface* et à la caractérisation du

comportement hydrologique des organisations pelliculaires de surface à partir d'expériences sous pluies simulées (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Un *état de surface* correspond au regroupement des paramètres descriptifs de la surface du sol (microrelief, construction de la mésofaune, organisation pelliculaires de surface) et de la végétation (couvert herbacé, type de cultures).

Les *états de surface*, s'ils renseignent sur les facteurs ponctuels de production du ruissellement, ne sont plus suffisants à l'échelle du versant ou du bassin versant car il est alors nécessaire de tenir compte des processus de transfert auxquels sont soumis les écoulements de l'amont vers l'aval. Une description du système de pentes et de l'organisation du réseau hydrographique est alors nécessaire. La carte des unités hydrologiques résulte donc, à l'échelle du bassin versant de la combinaison des critères : pente et *état de surface*.

Le levé de détail des unités hydrologiques s'appuie donc sur une cartographie des *états de surface* suivant la méthode décrite par CASENAVE et VALENTIN (1989) et sur la réalisation d'une carte topographique à grande échelle. Dans le cas du bassin de Sama Dey, les observations de terrain ont été reportées à l'échelle du 1/5 000 (RAJOT et ESTEVES, 1994). L'ensemble des documents cartographiques a été numérisé pour constituer une base de données géographiques, dont la gestion est assurée par le logiciel ILWIS (MEIJERINK, 1990). Elle a été complétée par un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 20 mètres et par les principales caractéristiques morphologiques (pentes et courbures) calculées à partir du MNT.

La cartographie détaillée des *états de surface* a permis d'identifier 15 unités. Un premier regroupement a été opéré pour la cartographie au 1/20 000. La distribution des pentes a été découpée en 5 classes. Le tableau 1 présente les regroupements effectués pour aboutir aux 9 unités hydrologiques définies sur le bassin versant de Sama Dey. Les opérations de combinaisons cartographiques ont été réalisées à l'aide des fonctions d'analyse spatiale de ILWIS. La carte finale est présentée à l'échelle du 1/20 000.

La carte des unités hydrologiques du bassin de Sama Dey (figure 1), montre que les zones de production importante de ruissellement sont situées dans les parties hautes du bassin et représentent à peine plus du dixième de la superficie totale. Près de la moitié du bassin est composée de zones à faible aptitude au ruissellement, qui correspondent en général aux zones cultivées à mi-versant. Remarquons l'existence d'importantes zones d'infiltration en périphérie de la cuvette, qui contrôlent les apports en provenance de l'amont.

Carte des unités hydrologiques du bassin versant de Sama Dey

-  Unité 1
-  Unité 2
-  Unité 3
-  Unité 4
-  Unité 5
-  Unité 6
-  Unité 7
-  Unité 8
-  Unité 9

Esteves Michel ORSTOM Niamey

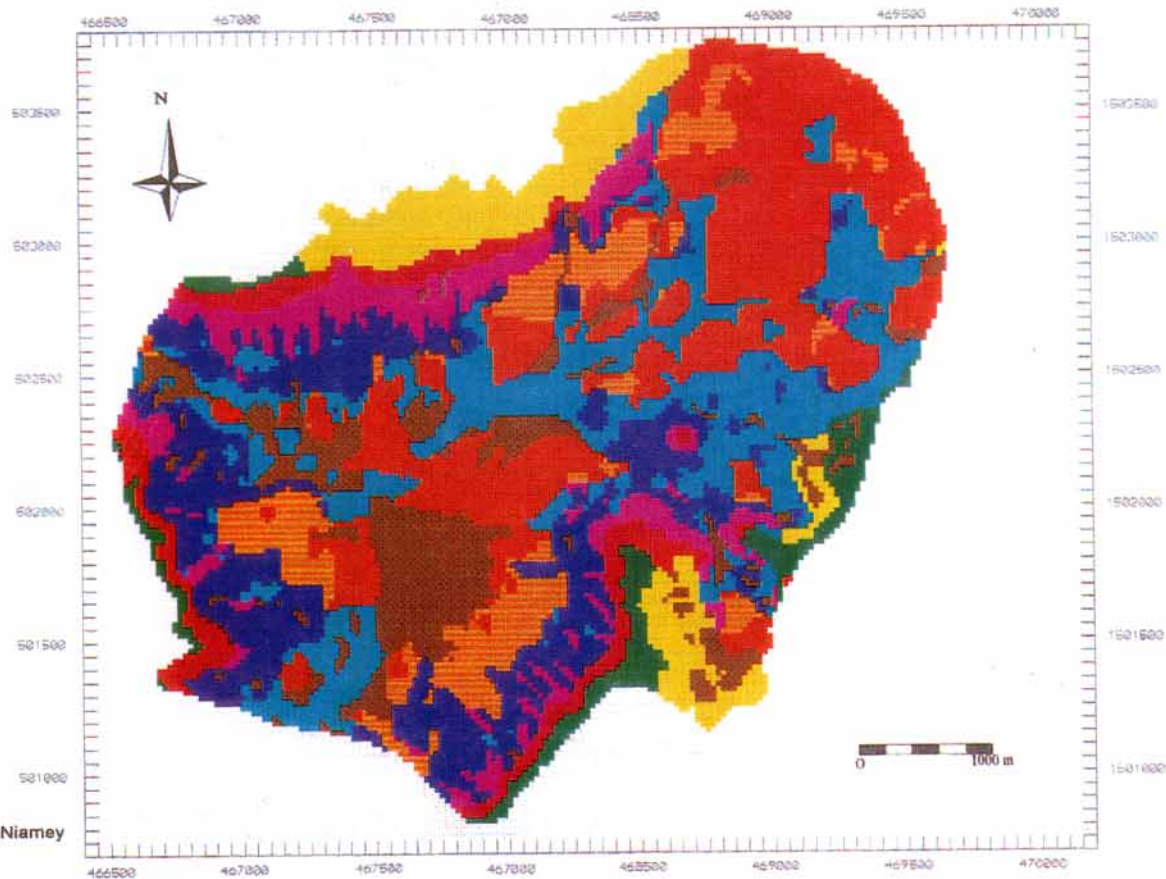


Figure 1 :

Carte des unités hydrologiques du bassin versant de Sama Dey.

Tableau 1

Critères de détermination des unités hydrologiques du bassin de Sama Dey

Unités	Pentes	État de surface	Aptitude au ruissellement	% superficie totale
1	2 - 4 %	Talus	Modérée	5.3
2	0 - 2 %	Sol nu de plateau	Forte	3.8
3	0 - 4 %	Recouvrement sableux sur plateau	Faible	7.8
4	0 - 2 %	Jachère	Faible	17
5	2 - 8 %	Jachère	Modérée	16.7
6	0 - 2 %	Champs de mil	Faible	23
7	2 - 8 %	Champs de mil	Modérée	8.4
8	> 4 %	Piémont à croûte d'érosion	Forte	7.2
9	0 - 4 %	Épandage sableux, fourré	Nulle	10.8

CARTOGRAPHIE DES UNITÉS HYDROLOGIQUES À L'ÉCHELLE DU SITE CENTRAL EST

Pour la carte du *site central est* la démarche présentée précédemment n'est pas envisageable car il n'existe aucun document topographique précis (cartes à grande échelle, modèle numérique de terrain), ainsi nous avons opté pour une interprétation stéréoscopique des photographies aériennes disponibles sur ce secteur. Cette approche permet d'apprécier le relief et de déterminer les grandes classes de pentes. Les documents utilisés sont : les photographies aériennes panchromatiques noir et blanc à l'échelle moyenne du 1/60 000 (IGN, mars 1975) et les photographies aériennes panchromatiques couleur à l'échelle du 1/25 000 (Nasa, septembre 1992). Les unités délimitées, à partir de l'analyse photographique complétée par des observations de terrain pendant la saison des pluies, ont été reportées sur une « mosaïque semi contrôlée » à l'échelle du 1/100 000. Comme dans le cas de Sama Dey, la minute finale a été numérisée avec le système d'information géographique Ilwis.

À cette échelle le critère *état de surface* n'est plus pertinent, car il représente un niveau taxonomique impossible à représenter. Parmi les critères possibles, nous avons retenu la pente, les unités géomorphologiques et l'aspect du réseau hydrographique. Les unités définies sont en principe homogènes en fonction de ces trois critères. Le tableau 2 regroupe pour chaque unité ses caractéristiques et la carte finale est présentée à l'échelle du 1/100 000.

Tableau 2Critères de détermination des unités hydrologiques sur le *site central est*

Unités	Pente	Unité géomorphologique	Organisation du drainage
1	Nulle	Plateau structural à cuirassement ferrugineux	Pas de réseau apparent, mares dans les petites dépressions
2	Forte (> 10 %)	Buttes résiduelles	Réseau divergent de ravines
3	Faible à modérée	Dépression de dissolution	Quelques ravines
4	Faible (< 2 %)	Accumulations éoliennes sableuses sur plateau	Pas de réseau apparent, les écoulements convergent vers des cuvettes
5	Modérée (2 à 4 %)	Glacis versant	Ravines parallèles ou subparallèles
6	Faible (< 2 %) versant rectiligne	Glacis	Quelques ravines
7	Faible (< 2 %) versant irrégulier	Glacis recouverts de dépôts éoliens	Les écoulements de surface peuvent converger vers des cuvettes
8	Modèle (2 à 4 %)	Dépression de dissolution	Réseau convergent de ravines
9	Nulle à faible	Glacis terrasse	Mares

Cette carte confirme l'absence d'organisation des réseaux hydrographiques. Les ravines sont majoritairement situées dans l'unité 5 et les écoulements produits sur les zones présentant une aptitude importante au ruissellement rejoignent les nombreuses cuvettes de cette région. Là ils s'infiltrent très rapidement. Les mares qui restent en eau durant toute la saison des pluies correspondent aux parties colmatées des cuvettes. La quantité totale d'eau infiltrée dans ces zones pendant la saison des pluies peut représenter plus de 10 fois le total pluviométrique local. Ces zones sont donc des points clés pour l'alimentation de la nappe. La redistribution de la pluie à l'échelle régionale par les écoulements de surface est négligeable, les transferts les plus importants ne dépassent pas quelques kilomètres. Les écoulements de surface n'interviennent que pour concentrer une partie des pluies vers des zones d'infiltration préférentielle (figure 2).

Le tableau 3 présente pour chaque unité son aptitude au ruissellement. Cette évaluation est grossière, elle repose sur les connaissances acquises jusqu'à maintenant et sur des observations qualitatives de terrain. Cette première analyse permet de classer les différentes unités et de préciser la redistribution à l'échelle saisonnière de la pluie sur le *site central est*. Il apparaît que le rôle principal revient à l'évapotranspiration.

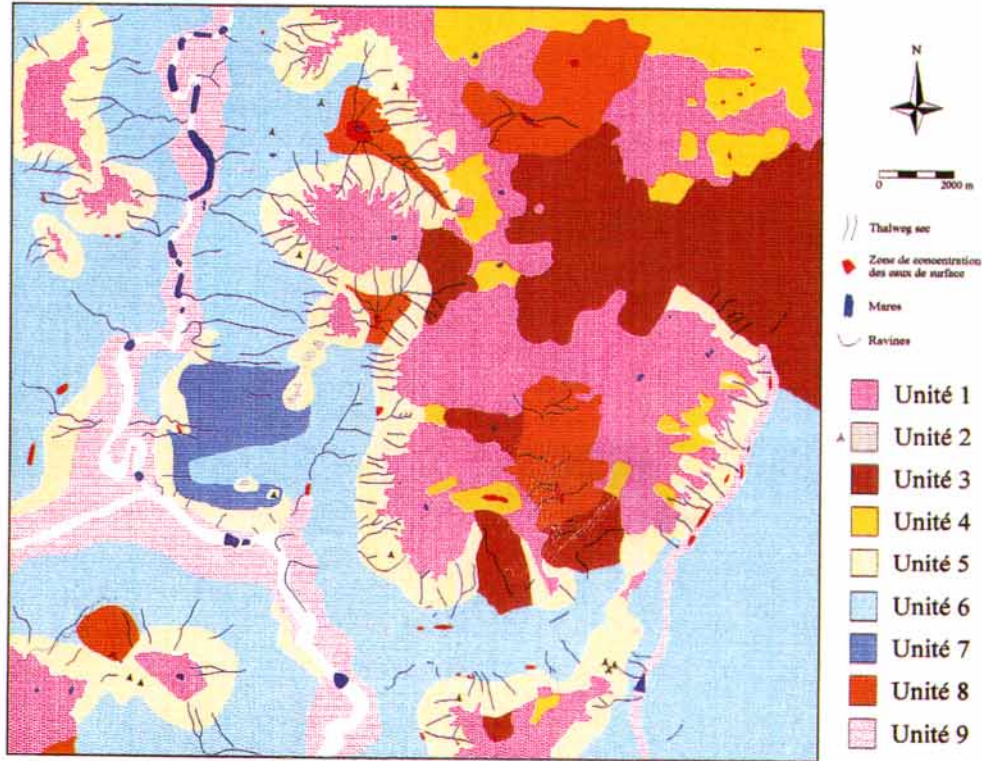


Figure 2 :
Carte des unités hydrologiques du site central est.

Tableau 3

Aptitude au ruissellement des unités hydrologiques et processus dominants de redistribution de la pluie à l'échelle saisonnière

Unités	Aptitude au ruissellement	Redistribution de la pluie à l'échelle saisonnière	% superficie totale
1	Fort	Évaporation et drainage interne dans les bandes de végétation	18.6
2	Fort	Ruissellement et évaporation	0.1
3	Faible	Évapotranspiration et drainage interne	10.8
4	Faible	Évapotranspiration	5.3
5	Fort	Ruissellement et évapotranspiration	15.8
6	Faible à Modéré	Évapotranspiration	32.1
7	Faible	Évapotranspiration	2.5
8	Modéré à fort	Drainage interne et évapotranspiration	5.4
9	Faible	Évapotranspiration et drainage interne	7.1

CARTOGRAPHIE DES UNITÉS HYDROLOGIQUES ET MODÉLISATION

Un modèle hydrologique est une représentation théorique simplifiée d'une réalité physique, et sa conception nécessite la définition d'une structure, la formulation de lois décrivant son fonctionnement (relations déterministes ou stochastiques) et la détermination de paramètres, constants ou variables, entrant dans ces relations. La mise en œuvre d'un modèle se fait en respectant les quatre étapes suivantes : caractérisation, identification, vérification et exploitation :

- la caractérisation permet le choix de la formulation mathématique et la mise au point des algorithmes. Ce choix découle de la détermination et de l'analyse des processus à représenter, et il est fonction des données disponibles et du problème à résoudre ;
- l'identification (ajustement ou étalonnage) consiste à attribuer aux paramètres les valeurs numériques correspondant au cas étudié ;
- la vérification (ou validation) permet de tester l'aptitude du modèle à représenter le comportement réel observé ;
- l'exploitation constitue la phase d'utilisation du modèle.

L'enchaînement de ces quatre étapes résulte d'un processus séquentiel et itératif, chaque étape doit être validée avant le passage à l'étape suivante. La validation d'une étape peut impliquer la modification des choix faits aux étapes antérieures.

Dans notre cas, les objectifs fixés à la modélisation sont la représentation de la production du ruissellement et de son transfert dans le paysage, et le calcul de bilans hydrologiques aux quatre échelles évoquées plus haut.

La cartographie des unités hydrologiques intervient à la première étape, celle de la caractérisation, en permettant la détermination des processus hydrologiques dominants et le choix des modèles à utiliser. Dans le cas de la modélisation hydrologique du *site central est*, l'utilisation d'un modèle sophistiqué pour représenter les écoulements de surface serait une erreur. À l'inverse l'essentiel des efforts doit porter sur une modélisation aussi réaliste que possible de l'évapotranspiration et de l'évaporation. Ces deux termes sont avec la pluie, les plus importants à l'échelle régionale.

Dans le cas d'une modélisation hydrologique distribuée, la cartographie des unités hydrologiques fournit un premier niveau de partition de l'espace. Elle présente une organisation du paysage avec la mise en évidence des zones de production de ruissellement, des zones de concentration des écoulements et d'infiltration. Ce découpage peut encore être affiné en utilisant d'autres informations.

CONCLUSIONS

L'approche cartographique de l'espace à différentes échelles a permis de déterminer les principaux processus hydrologiques actifs sur le *site central est*. Nos exemples indiquent qu'au delà du versant, le rôle des écoulements dans la redistribution des pluies est négligeable à l'échelle régionale. Les travaux en cours devront confirmer la pertinence de l'approche cartographique pour modéliser le ruissellement et son transfert de l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie H. De Brouwer de la Division Water Resources Survey de l'International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) d'Enschede pour avoir mis à sa disposition une version du logiciel Ilwis. Les fichiers dérivés du modèle numérique de terrain ont été calculés à l'aide des algorithmes développés par O. Planchon (Orstom, Ougadougou).

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., 1988 : Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du mètre carré au kilomètre carré. Étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Études et thèses, Orstom, 341 p.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 : Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Coll. Didactiques, Orstom, 227 p.
- COLLINET J., VALENTIN C., 1979 : Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XVII, 4. 283-328.
- ESTEVE M., LENOIR F., 1994 : Un exemple de fonctionnement hydrologique dans la région de Niamey : le bassin de Sama Dey. Colloques et Séminaires, Orstom, Paris, (dans cet ouvrage).
- GOUTORBE J.P., LEBEL T., TINGA A., DOLMAN H.J., ENGMANE E.T., GASH J.H.C., KABAT P., KERR Y.H., MONTENY B., PRINCE S., SELLERS P., WALLACE J., HOEPFFNER M., 1992 : Hydrological and atmospheric pilot experiment in the Sahel. Niger 1992. *Experimental Plan*, 176 p.
- MEIJERINK A.J., 1990 : Summary report on ILWIS development. *ITC Journal 1990-3*, 205-214.
- RAJOT J.L., ESTÈVES M., 1994 : Cartographie des états de surface de petits bassins versants dans la région de Niamey. Note, Orstom Niamey, 10 p., 3 cartes.