MERS REGIONALES

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT

R. E. Quélennec:

Extraction de sables coralliens et de coraux à l'île Maurice : Bilan et perspectives

PNUE : rapports et études des mers régionales n° 105

PNUE 1989

PREFACE

Le 3 janvier 1984, le Gouvernement mauricien a demandé au PNUE de l'aider à évaluer les incidences de l'extraction de sables coralliens sur le littoral et le lit des lagunes ainsi qu'à mettre au point une stratégie lui permettant de faire face à la raréfaction du sable et de le conseiller quant au choix des matériaux de construction de remplacement.

Pour donner suite à cette demande, une mission a été organisée par le PNUE en étroite collaboration avec les autorités nationales compétentes. La mission avait pour mandat :

- D'étudier les incidences écologiques de l'extraction de sables coralliens sur le littoral et le lit des lagunes;
- De mettre au point une stratégie prévoyant des procédés et des méthodes d'extraction de sables coralliens écologiquement rationnelles;
- De recenser les matériaux de construction locaux qui pourraient remplacer les sables coralliens.

Les membres de la mission se sont rendus à Maurice du 28 avril au 7 mai 1987. Le présent document est fondé sur leurs conclusions.

On y examine l'ampleur des prélèvements de sables coralliens et de l'érosion du littoral imputable à l'action de l'homme, on y propose d'autres sites d'extraction afin de soulager les pressions auxquelles sont soumises les carrières actuellement exploitées et des propositions sont avancées quant aux sources de matériaux de construction de remplacement.

La présente étude a été financée par le PNUE au titre du Plan d'action pour la protection, la gestion et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique orientale (Nairobi, 1985).

Bien que la présente étude porte sur les conditions propres à Maurice et comporte des données qui ne concernent que cette île, la méthode utilisée et les solutions envisagées pourront intéresser d'autres pays côtiers de la région de l'Afrique orientale connaissant les mêmes problèmes.

Le présent document a été établi par M. R.E. Quélennec. Le concours des autorités et du personnel de contrepartie de Maurice ainsi que du Bureau du PNUD à Port Louis a été indispensable au succès de la mission.

SOMMAIRE

	Page
RESUME	1
1. CADRE GEOGRAPHIQUE	3
1.1. Géographie et climat	3
1.2. Cadre géologique	4
1.3. Variations du niveau marin	4
2. MORPHOLOGIE LITTORALE	6
2.1. Partie méridionale de l'île : de Flic en Flac (côte Ouest) à Grande Rivière du Sud-Est (côte Est)	6
2.2. Partie septentrionale de l'île : de Beau Champ (côte Est) à Médine (côte Ouest)	8
2.3. Classification morpho-sédimentologique du littoral	10
2.4. Dépôts quaternaires calcaires consolidés	10
2.5. Dunes éoliennes et dépôts non consolidés d'arrière-plage	12
3. QUELQUES CARACTERISTIQUES DES RECIFS CORALLIENS ET LAGONS DE L'ILE MAURICE	14
3.1. Récifs coralliens	14
3.2. Lagons	18
4. EXTRACTION DE SABLES CORALLIENS ET DE CORAUX	21
4.1. Extraction de sables coralliens	21
4.1.1. Extraction en carrières terrestres	21
4.1.2. Extraction de sables dans le lagon	24
4.2. Extraction de corail et fabrication de la chaux	27
5. UTILISATION DES MATERIAUX ET ALTERNATIVES	30
5.1. Sables coralliens	30
5.1.1. Principales utilisations	30
5.1.2. Possibilités de substitution	30
5.2. Les coraux	31
5.3. Récapitulatif : Evolution des extractions et conséquences	32
5.4. Projets de cimenterie	34

Page

6. PROTECTION ET GESTION DU LITTORAL ET DES LAGONS 35

6.1. Interactions entre les milieux 35
6.2. Moyens scientifiques et techniques 35
6.3. Mesures législatives et réglementaires 36
6.4. Mesures administratives 37
6.5. Mesures parafiscales 37
6.6. Information et formation 37

7. CONCLUSIONS 38

LISTE DE REFERENCES 39

PHOTOS 41

ANNEXE 1 -Extraits d'un document intitulé "Coût des remises en état des carrières à des fins agricoles" 57
ANNEXE 2 - "Removal of Sand Act" 63
ANNEXE 3 - Effets des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines 69
ANNEXE 4 - Rapport de synthèse général - Séminaire sur la gestion régionale des sédiments 79

***

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 - Position de l'île Maurice dans l'océan Indien 3
Fig. 2 - Schéma structural de l'île Maurice 5
Fig. 3 - Courbe eustatique déduite pour les derniers 300 000 ans 6
Fig. 4 - Esquisse morpho-sédimentologique du littoral de l'île Maurice 11
Fig. 5 - Ile Maurice - Principaux dépôts littoraux éoliens et marins du quaternaire 13
Fig. 6 - Coupe d'un corail : Polypes et squelette corallien 14
Fig. 7 - Bloc diagramme synthétique de la pente externe des récifs coralliens Au-Vent de l'île Maurice 16
Fig. 8 - Reconnaissance préliminaire des récifs et des lagons de l'île Maurice - Position des sites reconnus 17
Fig. 9 - Variations dans l'extension des unités de peuplement de trois lagons de l'île Maurice 19
Fig.10 - Principales formes coralliennes 20
Fig.11 - Sites d'extraction de sables dans les lagons (autorisés en 1987) 26
Fig.12 - Usines à chaux en activité 28

RESUME

Le rapport conclut une mission d'expertise réalisée en avril-mai 1987, pour le PNUE et à la demande du Ministère mauricien du logement, des terres et de l'environnement (MLTE/MHLE), afin d'étudier les problèmes posés par l'extraction des sables coralliens et des coraux à l'île Maurice, et de rechercher des solutions alternatives.

Après une présentation des principales caractéristiques du littoral (une classification morpho-sédimentologique est proposée), des lagons et des récifs coralliens de l'île Maurice, on analyse les données recueillies sur les extractions et les divers usages des sables coralliens et des coraux.

Les solutions alternatives sont présentées en fonction des types de matériaux et de leur utilisation :

- il apparaît nécessaire et urgent d'interdire l'extraction de coraux dans les lagons (2 000 t/an) et de remplacer, pour la fabrication de la chaux, le corail par des matériaux calcaires issus de carrières terrestres;

- il semble possible de réduire de 160 000 t/an l'extraction de sables coralliens et de les remplacer par du sable basaltique produit par concassage.

De telles solutions devraient permettre de réduire à zéro, en 5 ans, les extractions de coraux et de sables dans les lagons.

Le rapport s'achève par des recommandations pour la protection et la gestion du littoral et des lagons de l'île Maurice, avec la présentation de moyens scientifiques et techniques, législatifs et réglementaires, administratifs, parafiscaux, d'information et de formation, à mettre en oeuvre progressivement par les autorités mauriciennes.

Cette mise en oeuvre serait favorisée par le lancement et le financement d'un projet d'assistance scientifique et technique dont les bases sont proposées dans un rapport annexe.

1. CADRE GEOGRAPHIQUE

1.1. GEOGRAPHIE ET CLIMAT

L'île Maurice est située dans l'océan Indien, à environ 800 km à l'est de Madagascar, et à 200 km au N.E. de la Réunion, entre 19°58 et 20°32 de latitude sud, et 57°17 et 57°46 de longitude est.

Elle fait partie de l'ensemble des îles Mascareignes, situées sur les hauts fonds qui se prolongent au N.E. de Madagascar par l'archipel des Seychelles. D'une superficie évaluée à 1 865 km^2, l'île Maurice est contenue dans un rectangle orienté nord-sud, de 60 x 52 km.

L'île est située sur un plateau continental très étroit au sud (1,5 à 2 km) et à l'ouest 2 à 5 km), qui s'élargit à l'est (2,5 à 10 km) et au nord-est, où il atteint 27 km et porte les îles suivantes : Coin de Mire, île Plate, îlot Gabriel, île Ronde, île aux Serpents. Le plateau continental est bordé, à l'est et à l'ouest par deux dépressions océaniques qui atteignent plus de 4 000 m de profondeur.

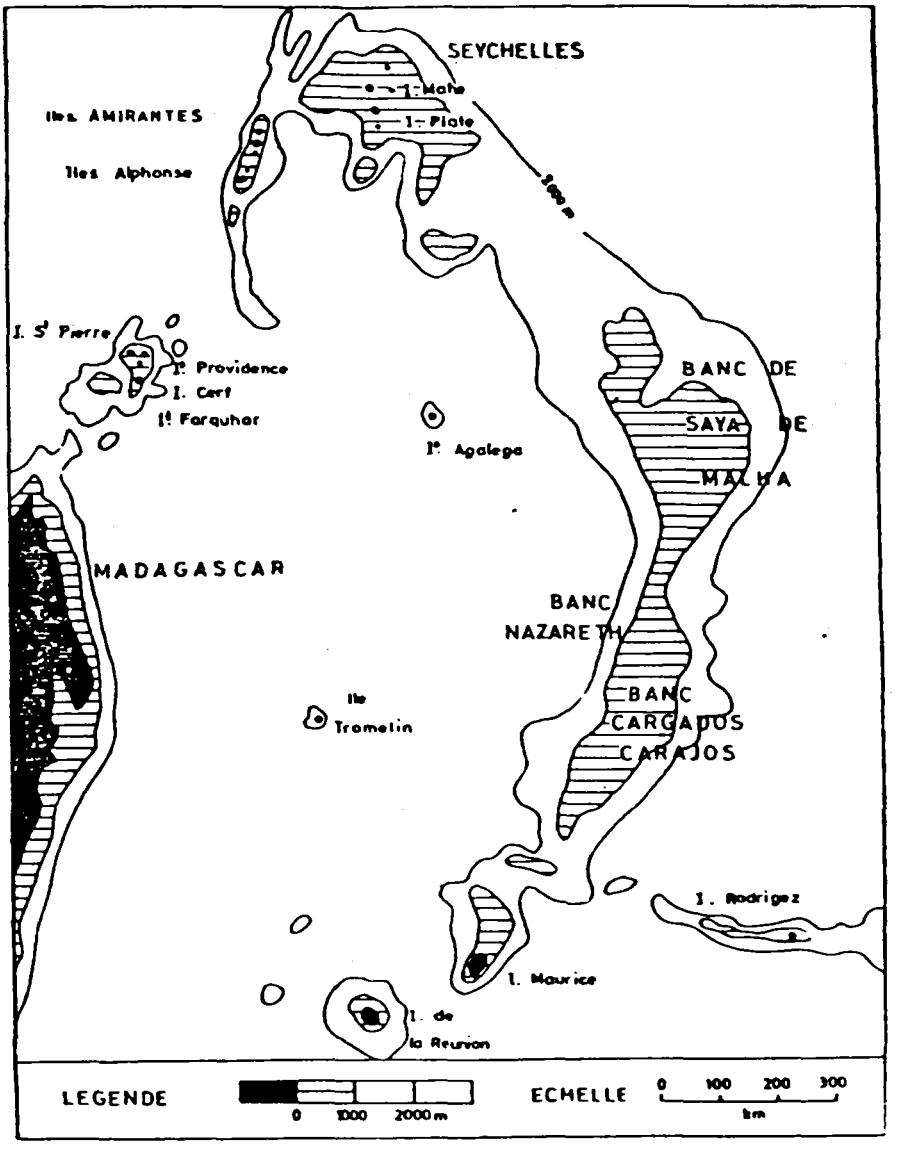


Fig. 1 - Position de l'île Maurice dans l'Océan Indien (réf. 2)

L'île est ceinturée par une barrière récifale quasi continue d'environ 150 km de longueur, interrompue en trois endroits, à l'ouest et au sud-est, sur une trentaine de kilomètres.

Le climat de l'île, de type tropical, varie du tropical humide durant l'été, au sub-tropical en hiver.

Les reliefs de l'île, bien que culminant à une altitude maximale de 828 m, et l'influence des vents dominants que sont les alizés du sud-est, engendrent des différences climatiques sensibles entre les "hauts" du plateau central et le littoral, et entre les zones "au vent" et "sous le vent" : 5 000 mm de pluie/an sur les reliefs des Midlands et du sud-ouest, contre moins de 1 000 mm à Flic-en-Flac ou à Grand Baie.

Les dépressions tropicales et les cyclones, qui surviennent généralement dans cette région de l'océan Indien entre novembre et mars, affectent assez régulièrement l'île Maurice, en y occasionnant d'importants dommages du fait de vents, vagues et pluies intenses.

1.2. CADRE GEOLOGIQUE

L'île Maurice, de formation volcanique, serait apparue au Pliocène, il y a environ 8 millions d'année (Ma) (Cf. Fig.2).

On distingue généralement (d'après E.S.W. Simpson, 1950; R. Battistini, 1970; B. Perroud, 1981) quatre grands épisodes dans la construction volcanique de l'île :

- Edification (8 à 6,8 Ma) des dômes volcaniques centraux qui constituent la série bréchique de base (coulées basaltiques à olivine, océanites) que l'on retrouve aujourd'hui à l'est immédiat de Port-Louis, dans le secteur Petite Rivière Noire - Grande Case Royale, ainsi qu'au nord de Mahébourg (Montagnes Bambous);

- Effondrement en caldeira de la partie centrale de l'édifice volcanique de base et injection de laves intrusives dites de la "série ancienne" (ankaramites, basaltes, aphyriques), datées de 6,2 à 5,5 Ma, qui subsistent encore aujourd'hui, bien qu'érodées, sous forme de reliefs caractéristiques : Morne Brabant, Tourelle du Tamarin, Piton de la Petite Rivière, etc;

- Nouvelle période volcanique active, vers 3,7 à 1,9 Ma, avec émissions de laves basaltiques alcalines à olivine, qui constituent la série "intermédiaire" et que l'on retrouve essentiellement dans la partie sud-ouest de l'île, dans le triangle Montagne Brise Fer, Piton du Fouge, Bel Ombre-Beau Champ;

- La série éruptive récente, datée de 0,7 à 0,025 Ma, a donné lieu à des épanchements basaltiques (Hawaïtes) issus de nombreux petits cratères de la dorsale médiane de l'île, et qui a recouvert aujourd'hui, sous des formes diverses liées à l'altération, environ 70% de la superficie de l'île.

1.3. VARIATIONS DU NIVEAU MARIN

Les variations eustatiques récentes et leur impact sur les formations littorales de l'île Maurice ont été étudiées par L. Montaggioni (1972, 1974, 1979) - (cf fig.3).

Selon cet auteur, on note, au Quaternaire, depuis la fin du Pléistocène moyen (0,3 Ma), la présence des épisodes caractéristiques suivants :

- Hauts niveaux marins: +5 à +6 m, vers 0,3 Ma, et +1,5 à +2 m vers 0,15 à 0,1 Ma;

- Episodes régressifs entre 80 000 et 40 000 B.P., puis entre 30 000 et 18 000 B.P., avec abaissement du niveau marin à environ -120 m, et remontée progressive à l'Holocène, pour atteindre le niveau actuel vers 2 000 à 1 000 B.P.

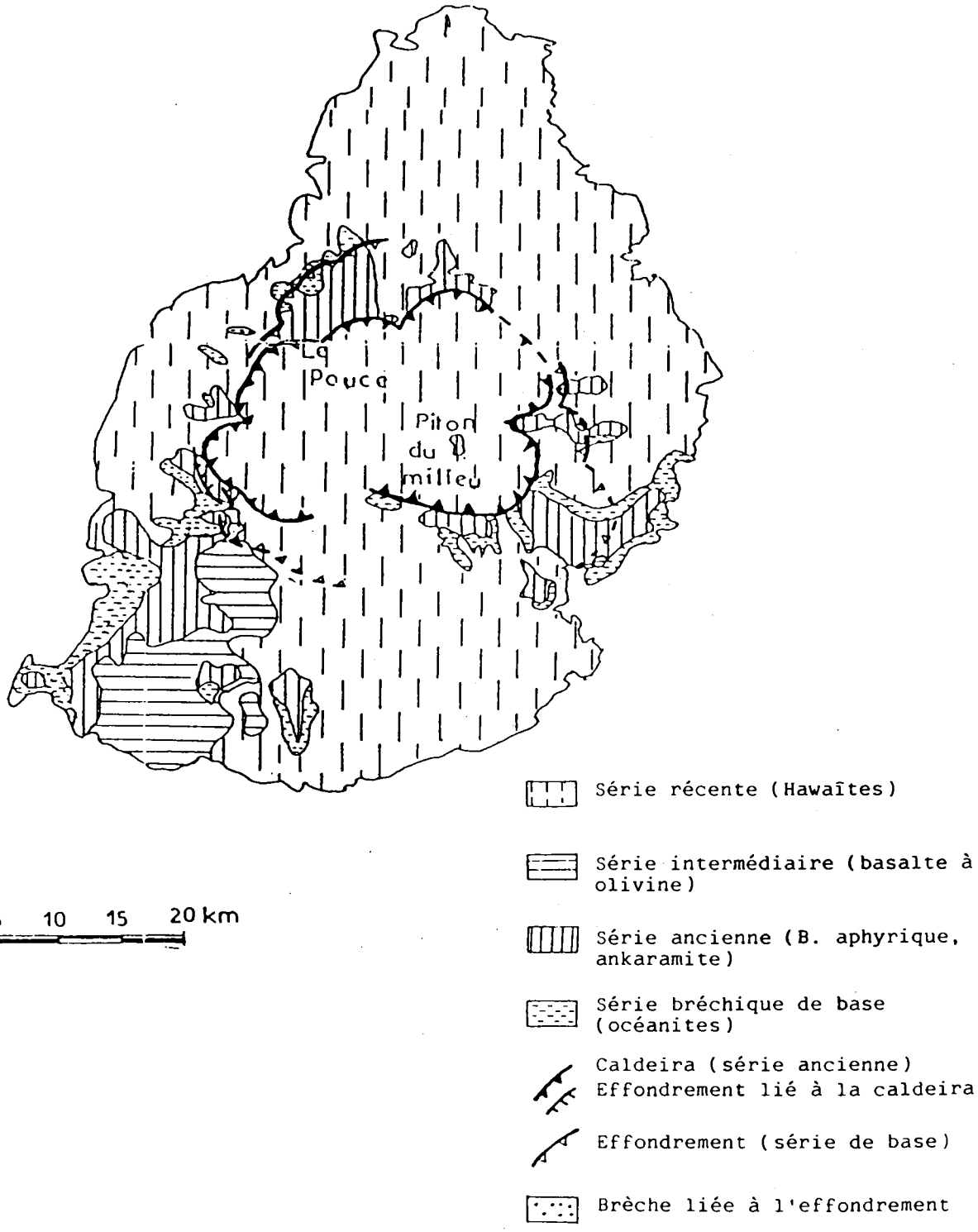


Fig. 2 - Schéma structural de l'Ile Maurice (d'après B. PERROUD, 1981)

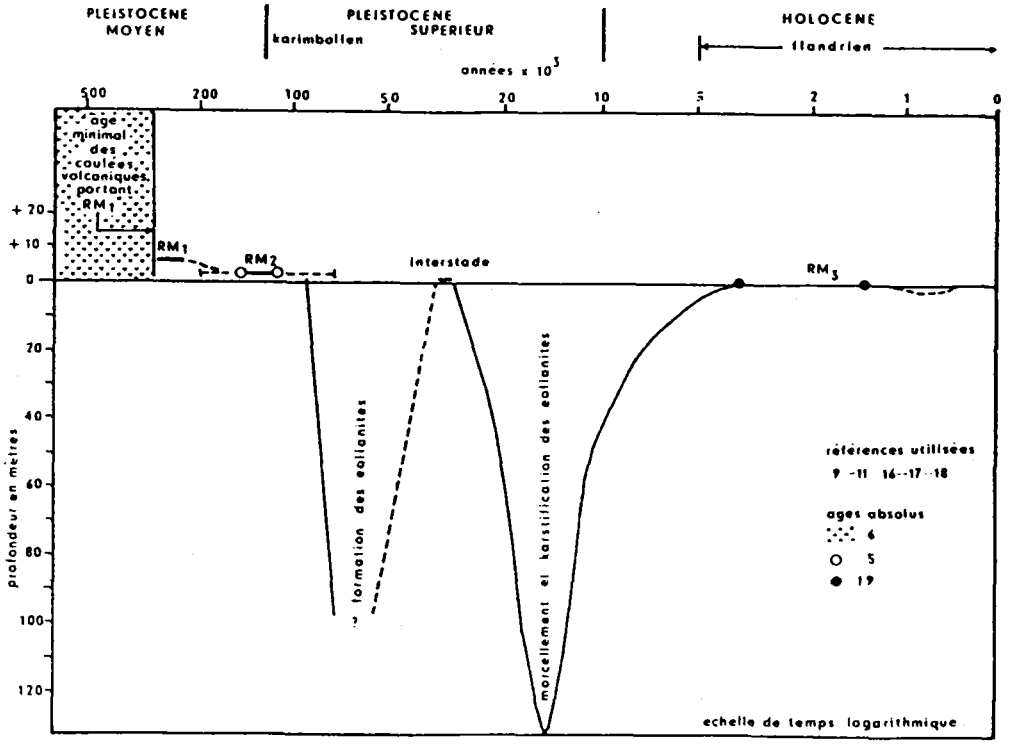


Fig. 3 - Courbe eustatique déduite pour les derniers 300.000 ans (d'après réf. 7)

2. MORPHOLOGIE LITTORALE

La description suivante du littoral de l'île Maurice est basée sur les quelques observations réalisées par l'auteur durant la mission. C'est pourquoi cette description préliminaire demanderait à être complétée par l'étude fine de chaque site spécifique, afin d'aboutir à une classification géomorphologique et sédimentologique plus détaillée du littoral et à une meilleure compréhension de son comportement dynamique.

2.1. PARTIE MERIDIONALE DE L'ILE : DE FLIC-EN-FLAC (COTE OUEST) A GRANDE RIVIERE DU SUD-EST (COTE EST)

De Flic-en-Flac à l'entrée de la baie du Tamarin, une longue plage de sable corallien, parfois interrompue par quelques pointements rocheux, est bordée par un cordon dunaire peu élevé planté de filaos. Quelques marques ponctuelles d'érosion sont visibles sur le haut de l'estran de la plage, au sud de Villa Caroline hôtel, à Flic-en-Flac (photo 1, planche 1).

La dune, côté terrestre, est exploitée sur plusieurs hectares à Wolmar, pour l'extraction industrielle de débris et sables coralliens (United Basalt sand plant) : sous le premier mètre de sables coralliens des carrières, on note la présence de couches plurimétriques de sables, débris coralliens (Acroporas, etc.) et de blocs de corail, qui indique la présence d'un ancien rivage émergé situé entre 100 et 200 m en arrière du rivage actuel.

La baie de Tamarin correspond à l'estuaire à marée des deux principales rivières (Rivière du Rempart et Rivière Tamarin-Boucan). L'embouchure, large et sinueuse, soumise aux houles du large du fait de l'absence de récifs barrière, est barrée de bancs migrants formés de sables vaseux terrigènes, graviers, galets basaltiques, et de débris coralliens. La partie sud-ouest de la plage publique de Tamarin, près de la clôture, montre des marques d'érosion sur une centaine de mètres. Le sable de cette plage, mélange de sables basaltique et corallien, est recouvert de placages de graviers et galets (photo 2, planche 1).

De la pointe du Tamarin à l'entrée de la baie de la Grande Rivière Noire, les plages sableuses relativement étroites, sont interrompues par quelques pointements rocheux et blocs erratiques. Le récif barrière est très proche du rivage, si bien que l'hydrodynamique forte a favorisé la création d'un cordon dunaire en arrière-plage.

Le yacht-club est implanté sur une flèche sableuse en rive gauche de la baie de la Grande Rivière Noire. Le fond de la baie, peuplé de mangroves et siège d'une sédimentation active, est parsemé d'îlots sablo-vaseux colonisés par la végétation. En rive gauche, on note quelques marques d'érosion sur les plages de sables coralliens qui bordent la piste construite sur un cordon dunaire, qui va à la tour Martello et aux Salines.

De Petite Rivière Noire, au sud-est de la Pointe Marron (Morne Brabant), le littoral est dépourvu de plages de sables. Les estrans, étroits, limoneux et parsemés de galets et blocs, sont bordés de végétation (photo 3, planche 2), alors que l'île aux Bénitiers, en face dans le lagon, étale de longues et belles plages de sables coralliens.

Sur la face nord-ouest du Morne Brabant s'étend une très belle plage corallienne avec de nombreuses installations touristiques. L'arrière-plage est constituée d'un large cordon dunaire. La longue plage corallienne qui borde les installations du Beachcomber hôtel montre des signes évidents d'érosion : de nombreux ouvrages de défense transversaux, de type épis courts, en blocs de basalte, ont été implantés sur le rivage. L'efficacité de ces ouvrages de défense apparaît discutable (photo 4, planche 2).

Plus à l'ouest, à proximité de l'hôtel Méridien, le cordon dunaire a été récemment percé pour creuser un chenal de communication des eaux de la lagune intérieure avec le lagon. Deux épis courts chargés de garantir l'ouverture du chenal sont implantés sur la plage, à l'entrée du chenal. Il est à craindre que ces ouvrages modifient l'équilibre sédimentologique actuel de la plage dans ce secteur et occasionnent ponctuellement un recul du rivage au nord du chenal (photo 5, planche 3).

Des marques d'érosion (micro-falaises) sont visibles sur les plages, à l'extrémité de la pointe sud-ouest du Morne Brabant.

Entre Trou-Chenilles et le Morne Brabant, au nord de l'îlot Fourneau, se trouve une zone de sédimentation active avec un marais maritime protégé par des flèches sableuses.

Le lagon, au sud du Morne Brabant vers la baie de la Prairie, est très peu profond (0,50 à 1 m).

Du Morne à la baie du Cap, les plages coralliennes sont étroites. Quelques marques d'érosion sont visibles en quelques secteurs très limités de l'anse de la Prairie.

Plus à l'est, vers St Martin et Bel Ombre, les plages coralliennes d'extension limitée et aux estrans assez pentus, sont séparées par des éperons rocheux. Des structures de type beach rock bordent les plages par endroits.

De St Félix à Riambel, le récif barrière se rapproche du rivage, ce qui permet une hydrodynamique côtière forte. Les estrans des plages coralliennes, avec de nombreux pointements rocheux sont pentus (photo 6, planche 3). Un cordon dunaire dont la face littorale est plantée de filaos se développe de pointe aux Roches à Riambel et fait l'objet de rares extractions dans des carrières de sable.

De Souillac (Gris-Gris) à la pointe Chaour, la côte rocheuse formée de coulées doléritiques épaisses, avec des falaises et des escarpements, est fortement battue par la houle, du fait de l'absence de récif barrière au large (photo 7, planche 4).

De le Bouchon à Blue Bay, le relief côtier s'adoucit et les falaises font place de nouveau à des promontoires basaltiques séparant des plages coralliennes alimentées par un récif barrière proche du rivage. On note également la présence de cordons dunaires dans les secteurs de Pont Naturel et le Chaland.

La partie sud-est de la plage publique de Blue Bay connaît quelques problèmes ponctuels d'érosion, du fait que le transit littoral des sables est stoppé par le mur d'enceinte sud de l'hôtel Bleu Lagon, situé à la pointe Corps de Garde. De cette pointe à pointe Desny, le littoral sableux, avec quelques rares pointements rocheux, est pratiquement "privatisé" par des villas et résidences secondaires (campements) et rarement accessible de la route côtière. Le développement anarchique de petits appontements privés, de murs d'enceinte et d'épis sur les plages a favorisé la déstabilisation de ce littoral (photo 8, planche 4).

La baie de Mahébourg est la plus grande baie de l'île Maurice; les fonds sableux et vaseux dépassent 10 m de profondeur au niveau des chenaux et des passes : elle est protégée par le récif barrière qui s'éloigne jusqu'à 7 km de la côte. Au sud de la baie, de la pointe Desny à la pointe de la Colonie, le littoral est découpé par des amoncellements de blocs basaltiques qui enserrent quelques maigres placages sableux.

Les estuaires sont colonisés par la mangrove; dans le fond de la baie, les falaises argileuses de Terre Rouge sont sujettes à une érosion régulière. Plus au nord, à Vieux Grand Port (salle d'Armes), ces formations argileuses (altération des basaltes anciens) sont surmontées de coulées basaltiques métriques et de formations de grés calcaires dunaires durs à grains fins (Eolianites), que l'on retrouve notamment à l'île aux Aigrettes et sur les îlots au nord de la passe sud de la baie de Mahébourg.

De Pavillon du Grand Port à Grande Rivière du Sud-Est, le littoral, bordé par une route côtière, est caractérisé par l'absence de plages.

Un sable limono-vaseux portant des sédiments plus grossiers (graviers à blocs) occupe la partie supérieure des estrans étroits, qui émergent à marée haute (photo 9, planche 5).

Le clapot levé par le vent remet en suspension les sédiments argileux fins qui colorent en brun les eaux de la frange littorale.

2.2. PARTIE SEPTENTRIONALE DE L'ILE : DE BEAU CHAMP (COTE EST) A MEDINE (COTE OUEST)

De Beau Champ à Trou d'Eau Douce, le littoral, peu accessible et très découpé, est formé, comme les îles du lagon (île aux Cerfs, île de l'Est) de coulées basaltiques portant des plages sableuses plus ou moins étendues, séparées par des promontoires avec amas de blocs.

Plus au nord, de la pointe des Quatre Cocos où la chaussée basaltique rejoint le récif barrière, à la pointe de Flacq, le littoral formé d'une succession de plages coralliennes et de caps, est bordé d'un cordon dunaire bien développé. En arrière des plantations de filaos, sur le

cordon sableux, se développent des cultures de légumes (oignons, poivrons, tomates), spécialement dans la région de Belle Mare. Ce cordon porte également un golf et quelques grands hôtels, à la pointe de Flacq.

Dans la baie de Flacq, abritée par le récif barrière qui se trouve à 1,5 km du fond de la baie, les estrans bas et découpés sont formés de coulées et blocs basaltiques colonisés par la mangrove. Seuls les pointes avancées (pointe Desny) et le rivage nord près de la pointe Radeau portent de belles plages coralliennes appuyées sur des pointements basaltiques.

De la pointe Lafayette à la pointe des Roches Noires, d'épaisses coulées basaltiques formant dalles et petites falaises (poste Lafayette) bordent le rivage rocheux battu par la houle et portent une dune bordière bien développée dont le pied forme un estran perché (photo 10, planche 5).

Cette dune, qui porte de nombreux campements (villas) se poursuit plus au nord jusqu'à Roches Noires où des placages coralliens permettent l'édification de plages entre des promontoires, en raison de l'éloignement du récif barrière de la côte.

La baie abritée de Roches Noires à pointe Lascars, peu profonde, fait l'objet d'une forte exploitation par des pêcheurs de sables.

De la pointe de l'Embarcadère à Grand Gaube, le littoral bas et très découpé est constitué de résidus des coulées basaltiques peu épaisses formant amoncellement de blocs, avec présence de mangroves développées, spécialement dans la région de Poudre d'Or et de l'île d'Ambre. Les plages sableuses y sont absentes (photo 11, planche 6).

De Grand Gaube à cap Malheureux, de rares et maigres plages coralliennes sont enserrées entre des caps et champs de boules basaltiques.

Plus à l'ouest, jusqu'à Grand Baie, le littoral rocheux et bas porte des plages sableuses mieux développées (Bain Boeuf, Péreybère) et bordées par un cordon dunaire qui atteint 6 à 7 m de hauteur à Bain Boeuf. On y note aussi la présence de beach rock sur l'estran, notamment sur cette dernière plage (photo 12, planche 6).

De belles plages coralliennes se développent dans les parties sud et nord-ouest de Grand Baie, où le tourisme est très développés (hôtels, yacht-club) en raison du caractère très abrité de la baie.

Le littoral situé plus au nord, vers la pointe des Canonniers, avec un cordon dunaire très urbanisé, est également pourvu de petites plages coralliennes séparées par des pointements et amas basaltiques.

Au sud de la pointe aux Canonniers, qui abrite le Club Méditerranée, se développe la belle et large plage publique de Mont Choisy, bordée de plantations de filaos sur la dune. Quelques légères marques d'érosion sont visibles au niveau des installations du Club (murs déchaussés) ainsi que vers le milieu de la plage de Mont Choisy.

De Mont Choisy à Trou aux Biches, le littoral bordé d'une dune très urbanisée (hôtels, campements, golf) est constitué d'alternances de petites plages coralliennes et de caps avec dalles et amas basaltiques (photo 13, planche 7). Cette morphologie côtière se poursuit plus au sud jusqu'à pointe aux Piments où le récif externe rejoint le rivage et où la plage porte quelques marques légères d'érosion.

L'estuaire de la baie du Tombeau abrite, en rive droite, la petite plage du Goulet où une amorce de tombolo se forme à l'arrière d'un ancien quai de débarquement partiellement détruit.

De la baie du Tombeau à Roche Bois, la dune bordière est très urbanisée (campements) et les accès aux plages sont rares. Les estrans des plages coralliennes, de faible largeur, sont directement bordés par les habitations dont certains murs d'enceinte trop proches du rivage, sont déstabilisés. Quelques dalles de beach rock sont visibles sur l'estran, notamment à baie du Tombeau.

La baie de Port-Louis, fortement polluée, est caractérisée par la présence d'estrans sablo-vaseux et la construction de remblais artificiels pour les installations portuaires et les zones industrielles qui ont connu un fort développement récent.

En rive gauche de la baie de la Grande Rivière Nord Ouest, se développent les plages de pointe aux Sables où apparaissent quelques pointements rocheux sur l'estran. L'arrière plage est bordée par un cordon dunaire qui supporte de nombreux campements.

De la pointe aux Sables jusqu'à Médine, le littoral est rocheux avec des escarpements et des falaises qui s'élèvent à une dizaine de mètres de hauteur dans le secteur de pointe aux Caves (photo 14, planche 7), qui porte un phare. La seule plage de cette zone se trouve dans la baie de la Petite Rivière à Albion, où une flèche sableuse déporte le cours de la rivière vers le sud de la baie. La partie centrale de la plage d'Albion, où le beach rock affleure sur l'estran, porte des marques d'érosion liée notamment au passage du cyclone de 1983.

2.3. CLASSIFICATION MORPHO-SEDIMENTOLOGIQUE DU LITTORAL

Les observations précédentes nous conduisent à proposer la classification préliminaire suivante, pour le littoral de l'île Maurice (fig. 4).

(A) - Falaises, escarpements rocheux
(B) - Côte rocheuse basse et découpée, avec plages de poche
(C) - Estrans limoneux, caillouteux et étroits
(D) - Plages développées : sables coralliens
(E) - Zones estuariennes.

On notera l'influence du schéma géologique structural (fig. 2) sur la morphologie du littoral:

- La série basaltique récente (Hawaïtes, 0,7 à 0,25 Ma) qui recouvre la majeure partie de l'île (plus de 70%) donne lieu aux faciès et formations sédimentaires littorales de type A, B, D;

- Les faciès littoraux de type C correspondent à des alluvions anciennes et récentes issues de l'altération de l'ancienne série bréchique de base (Océanites : 8 à 6,7 Ma) qui libère limons et argiles sur les rivages et dans les eaux des lagons.

2.4. DEPOTS QUATERNAIRES CALCAIRES CONSOLIDES

La présence, en bordure du littoral de l'île Maurice, de nombreux dépôts quaternaires est signalée par divers auteurs, dont E.S.W. Simpson, 1950; J.B. de Baissac et al., 1962; P.C. Wright, 1967; R. Battistini, 1970; L. Montaggioni, 1972, 1979.

L'extension, la nature et les caractéristiques de ces dépôts sont essentiellement variables. Parmi les dépôts quaternaires émergés qui semblent avoir la plus grande extension, on peut citer ceux des sites suivants:

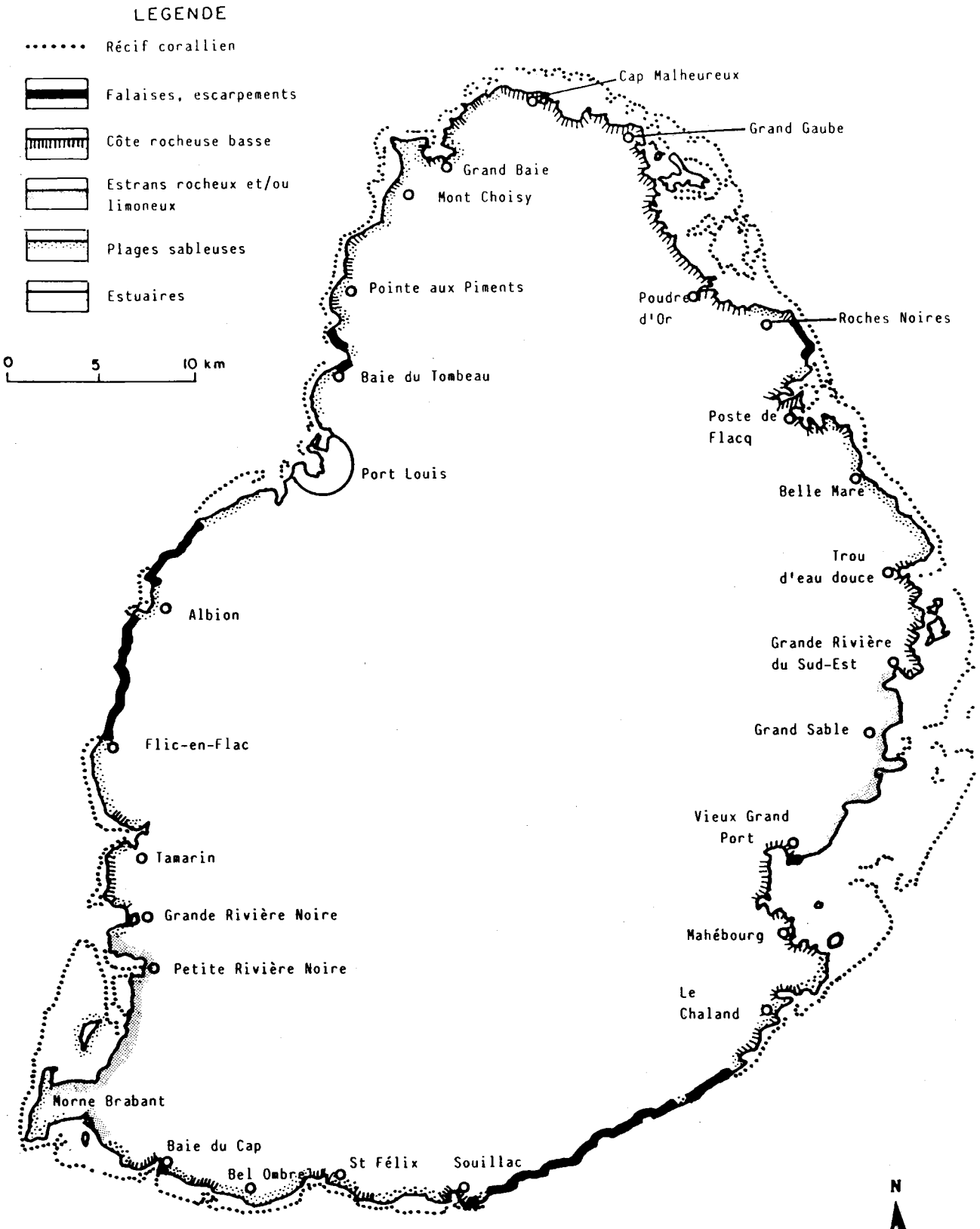


FIG. 4 - ESQUISSE MORPHO-SEDIMENTOLOGIQUE DU LITTORAL DE L'ILE MAURICE

BRGM

- Pointe Corail de la Prairie (sud-ouest) : grés calcaires fins, en bordure de la plage, surmontés d'éolianites et de débris coralliens enchâssés dans un ciment calcaire composé de sables et débris coquilliers; cet ensemble forme une butte de 12 m de hauteur traversée par des avens et réseaux de circulation karstique (photo 15, planche 8);

- Vieux Grand Port/Salle d'Armes (est) : bancs de grés calcaires fins et jaunâtres (éolianites) sur une dizaine de mètres d'épaisseur, reposant sur des coulées de basalte qui recouvrent, en bordure de mer, des couches métriques argileuses et rougeâtres d'altération des basaltes anciens; ce site fait l'objet d'une exploitation, depuis 1959, pour la fabrication de chaux par l'usine de Mahébourg Lime Cy (photo 16, planche 8);

- Ile aux Aigrettes/baie de Mahébourg (est) : cette île paraît être, comme les autres îlots de la baie (Passe, Vacoas, Fouquets, Marianne, Fous, Singe, Chat), entièrement constituée de grés calcaires fins sujets, localement, à des processus de karstification, ainsi qu'à la formation de plate-formes externes d'abrasion sous l'effet des houles et du clapot.

Parmi les nombreux autres affleurements de calcaires consolidés (coraux anciens, brèches coralliennes, grés calcaires, calcarénites, etc.) en bordure (côté terrestre) du littoral de l'île Maurice, on notera ceux des principaux sites suivants (fig. 5) : cap Malheureux, île Gabriel, baie de l'Arsenal, Port-Louis, Flic-en-Flac, Tamarin, Petite Rivière Noire, baie du Cap, Bel Ombre, Beau Champ, pointe Bambou.

Rappelons également la présence, sur l'estran des plages actuelles, de formations découvertes de grés de plage en dalles (beach rocks) visibles, notamment sur les plages nord-ouest de Bain Boeuf/Beau Manguier, baie du Tombeau et Albion. Des formations équivalentes, situées à une altitude supérieure, sur la partie haute de l'estran, ou en arrière-plage, peuvent être trouvées dans le secteur de baie du Cap, au sud-ouest et celui de Poste de Flacq, à l'est.

2.5. DUNES EOLIENNES ET DEPOTS NON CONSOLIDES D'ARRIERE-PLAGE

La majorité des plages sableuses actuelles de l'île est bordée par un cordon dunaire de largeur variant généralement entre 30 et 100 m, et d'altitude comprise entre 5 m et une dizaine de mètres (fig. 5).

Dans certains secteurs, comme à Trou-aux-Biches (nord-ouest), Flic-en-Flac - Wolmar (ouest), St Félix-Riambel (sud-ouest) et Belle-Mare (est), la plaine basse comprise entre la dune bordière et les reliefs continentaux est constituée d'anciens dépôts sableux éoliens et marins, avec débris coralliens et coquilliers (Wolmar) qui ont fait ou font l'objet d'extractions dans des carrières.

Les dépôts marins non consolidés d'arrière-plage renfermant des débris coralliens grossiers, comme à Wolmar, correspondent à l'époque du Pléistocène moyen à supérieur (0,1 à 0,3 Ma) où le niveau moyen de la mer était situé entre +5 à 6 m et +2 m par rapport au niveau marin actuel (fig. 3).

L'identification, éolienne, du système de dunes bordières actuelles a probablement été initiée il y a 80 000 ans, à la fin du Pléistocène récent, à l'occasion des deux phases de régression du niveau marin qui ont abaissé ce dernier à environ -200 m vers -18 000 B.P.

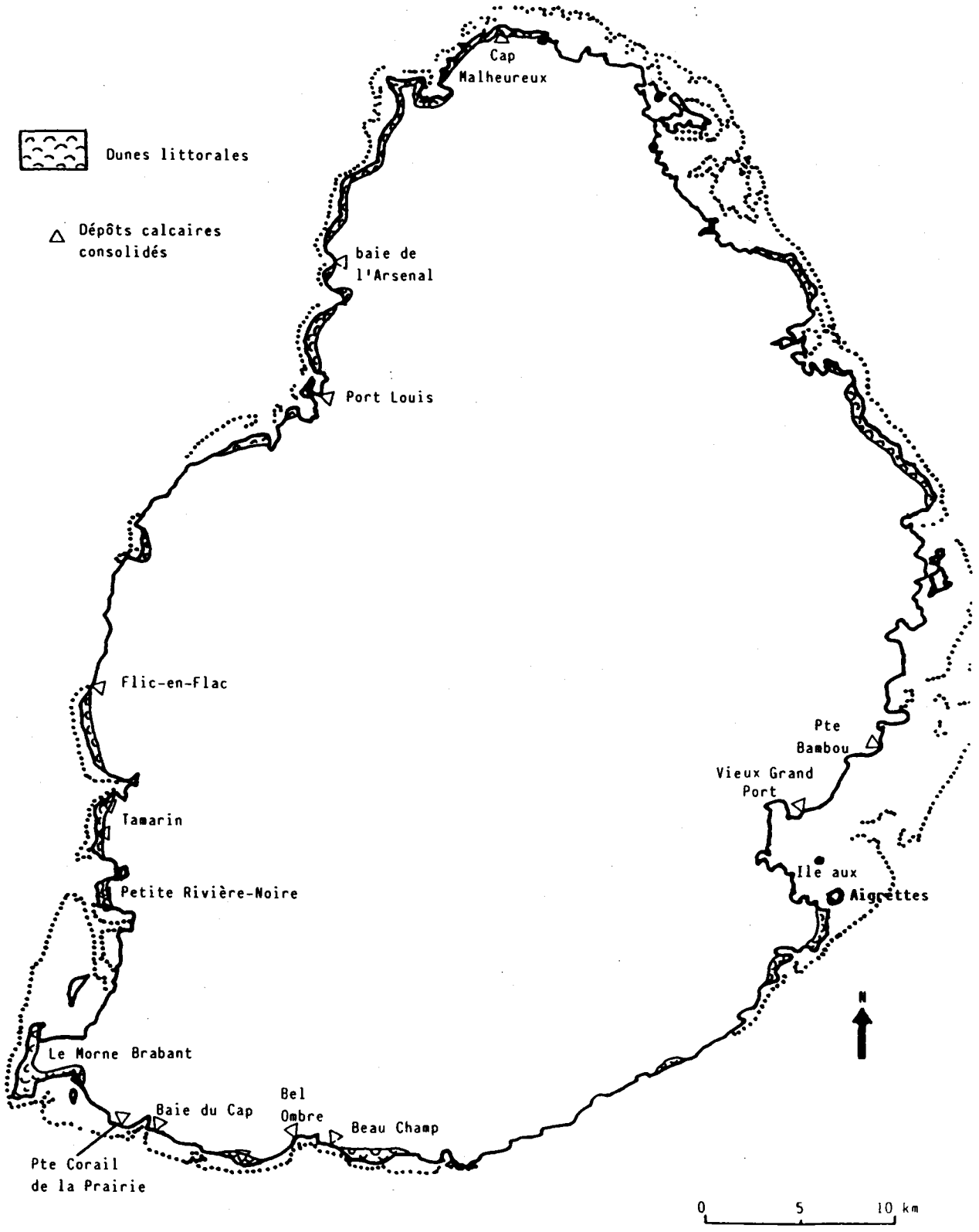


FIG. 5 - ILE MAURICE - PRINCIPAUX DEPOTS LITTORAUX EOLIENS ET MARINS DU QUATERNAIRE

BRGM

3. QUELQUES CARACTERISTIQUES DES RECIFS CORALLIENS ET LAGONS DE L'ILE MAURICE

3.1. RECIFS CORALLIENS

Une barrière de récifs coralliens ceinture presque complètement le littoral de l'île, à l'exception des secteurs côtiers suivants, caractérisés par la présence de falaises fortement battues par la houle (voir fig. 4) :

- Sud-est : Souillac à Pont Naturel;
- Ouest : Flic-en-Flac à baie de la Petite-Rivière, et pointe de la Petite-Rivière à pointe aux Sables.

La barrière corallienne externe est percée de nombreuses passes qui correspondent aux embouchures et chenaux sous-marins des rivières anciennes et actuelles, ainsi qu'à des brèches naturelles, et permettent la vidange des eaux fluviales et océaniques qui pénètrent dans le lagon.

La ceinture des récifs barrière se subdivise en réseaux complexes dirigés vers l'intérieur du lagon, à proximité des passes et des îlots situés dans le lagon : cas des lagons de Poudre d'Or, de Poste de Flacq, des baies de Mahébourg et Petite Rivière Noire.

La barrière récifale est une formation calcaire complexe qui résulte de la croissance de colonies vivantes de Madrépores : le matériau appelé "corail" constitue le squelette calcaire (Aragonite) externe de petits invertébrés marins vivant en colonies et appelés polypes coralliens.

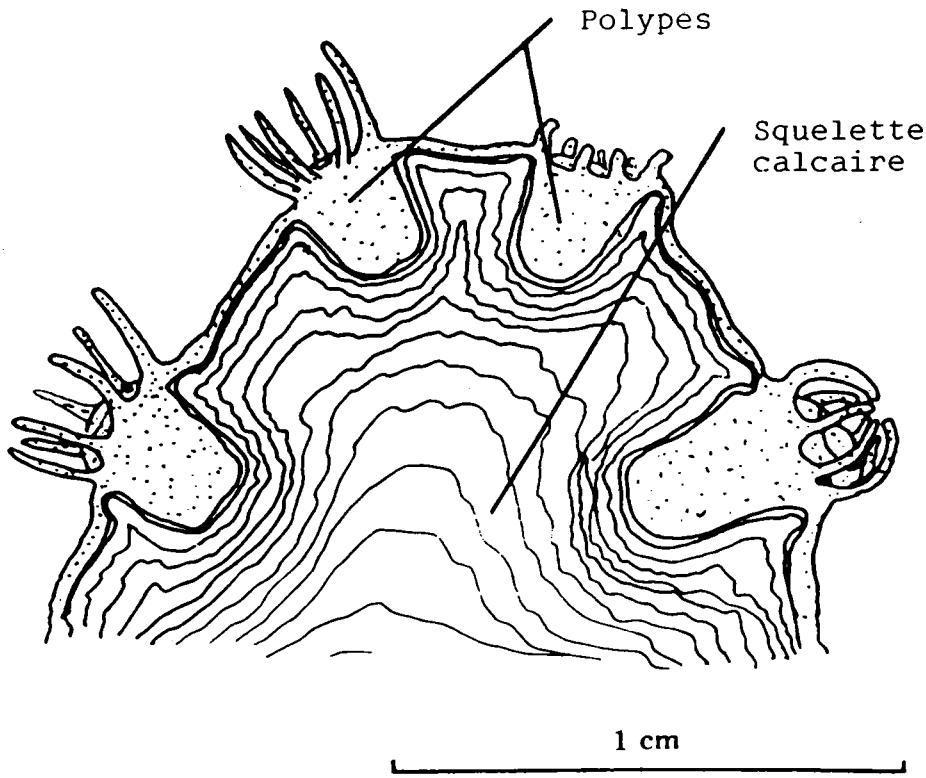


Fig. 6 - Coupe d'un corail : polypes et squelette corallien (d'après réf. 6)

La croissance d'un édifice récifal se fait verticalement et latéralement. Les vitesses de croissance varient en fonction des espèces coralliennes et des conditions du milieu, du 1/10 de millimètre à quelques centimètres/an.

L'étude de la pente externe des récifs de la barrière orientale de l'île Maurice (G. Faure et L. Montaggioni, 1976) a permis de mettre en évidence, dès les fonds de -15 à -20 m, la présence de dalles volcaniques à faible pendage (10 à 12°) qui servent d'assises aux constructions récifales (fig. 7).

Il est donc évident que l'édification des récifs barrière, présents actuellement sur cette côte, est postérieure aux épisodes volcaniques qui ont produit ces coulées en mer. Certains auteurs pensent que ce type de récifs barrière se serait édifié à l'époque Holocène, au cours des 5 000 dernières années, durant la récente transgression marine, ce qui conduirait à un taux moyen de croissance verticale supérieure à 4 mm/an.

A l'époque actuelle, en raison de la quasi-stationnarité du niveau marin, la croissance des édifices coralliens des récifs barrière se fait essentiellement latéralement.

La partie sommitale des récifs barrière, arasée par l'action hydrodynamique des houles océaniques, se situe à un niveau voisin des plus basses mers de vive eau (PBMVE) : elle est constituée d'un platier corallien rainuré de largeur variant, selon les secteurs de l'île, entre 5 et 25 m. Ce platier est constitué d'une sorte de béton calcaire formé d'amas de Madrépores cimentés par les algues calcaires (Lithothamniées).

Sur les pentes externe et interne du récif barrière se développent diverses colonies madréporiques, ainsi que des colonies d'algues calcaires et des Alcyonnaires.

D'une reconnaissance préliminaire récente (C.W. Gill, 1987) effectuée sur la pente externe des récifs barrière en 10 stations à l'ouest de l'île Maurice (fig. 8), nous tirons les enseignements suivants :

- Présence de nombreux poissons prédateurs de coraux et d'un individu d'Acanthaster* sur les récifs du Morne;

- La plus forte proportion de coraux vivants (50 à 75%) a été estimée pour les récifs de Flic-en-Flac;

- Pour les autres barrières récivales (Grande Rivière Noire, Albion, baie du Tombeau, Trou-aux-Biches), cette proportion varie de 30 à 45%, ce qui est faible et indique que ces récifs sont, actuellement sujets à des "stress" liés probablement à des perturbations d'origine anthropique (pêcheurs de corail, pêche à la dynamite, pollution, etc.) et météorologique (cyclones).

Il est fortement souhaitable que de tels inventaires, avec stations d'études et de référence disséminées sur l'ensemble du pourtour des récifs barrière soient réalisés prochainement à l'île Maurice, afin de pouvoir prendre les mesures de protection et de conservation qui s'imposent.

---

*Echinoderme (étoile de mer) épineux, mangeur de corail, qui peut atteindre 60 cm de diamètre.

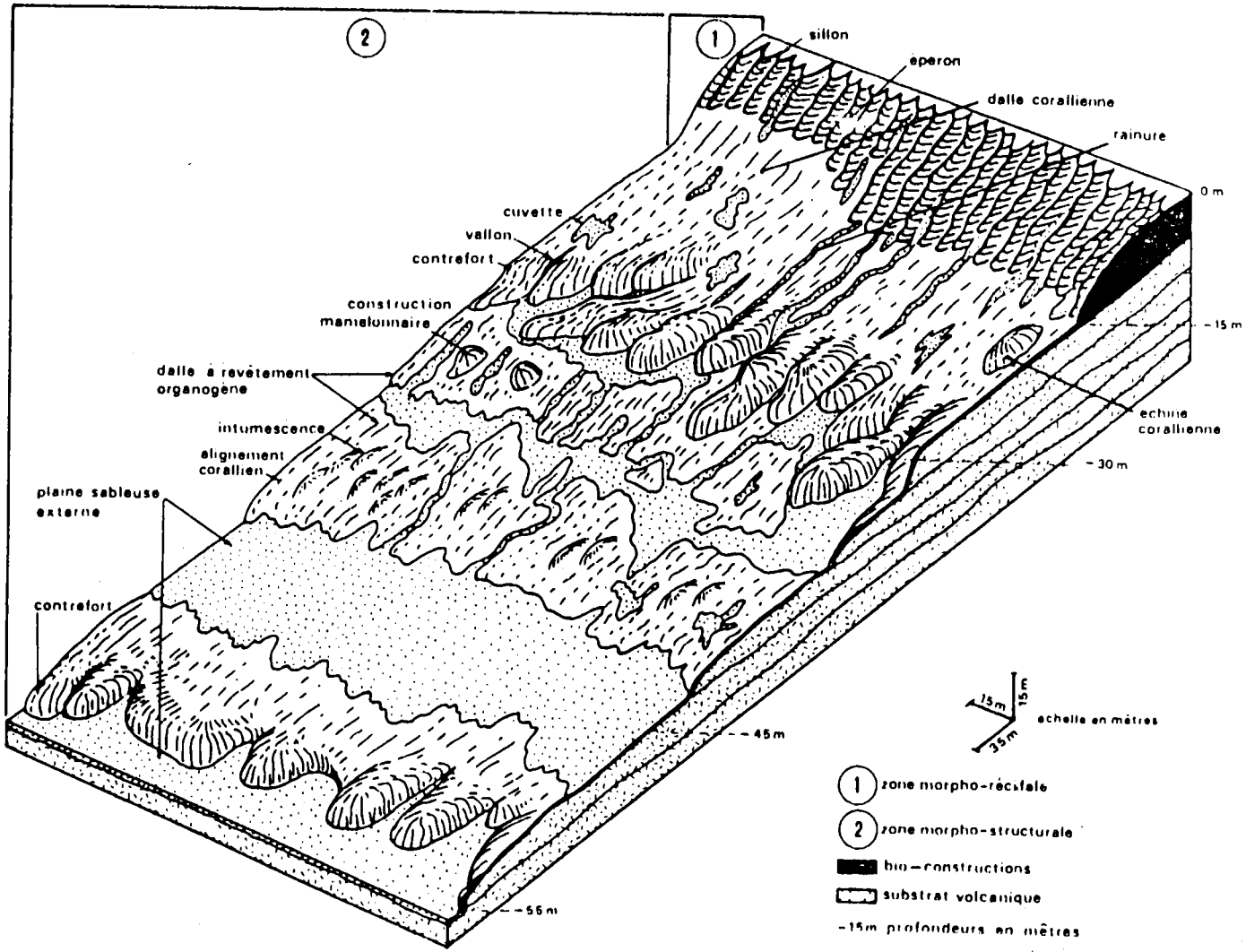


Fig. 7 - Bloc diagramme synthétique de la pente externe des récifs coralliens Au-Vent de l'Ile Maurice (d'après réf. 4)

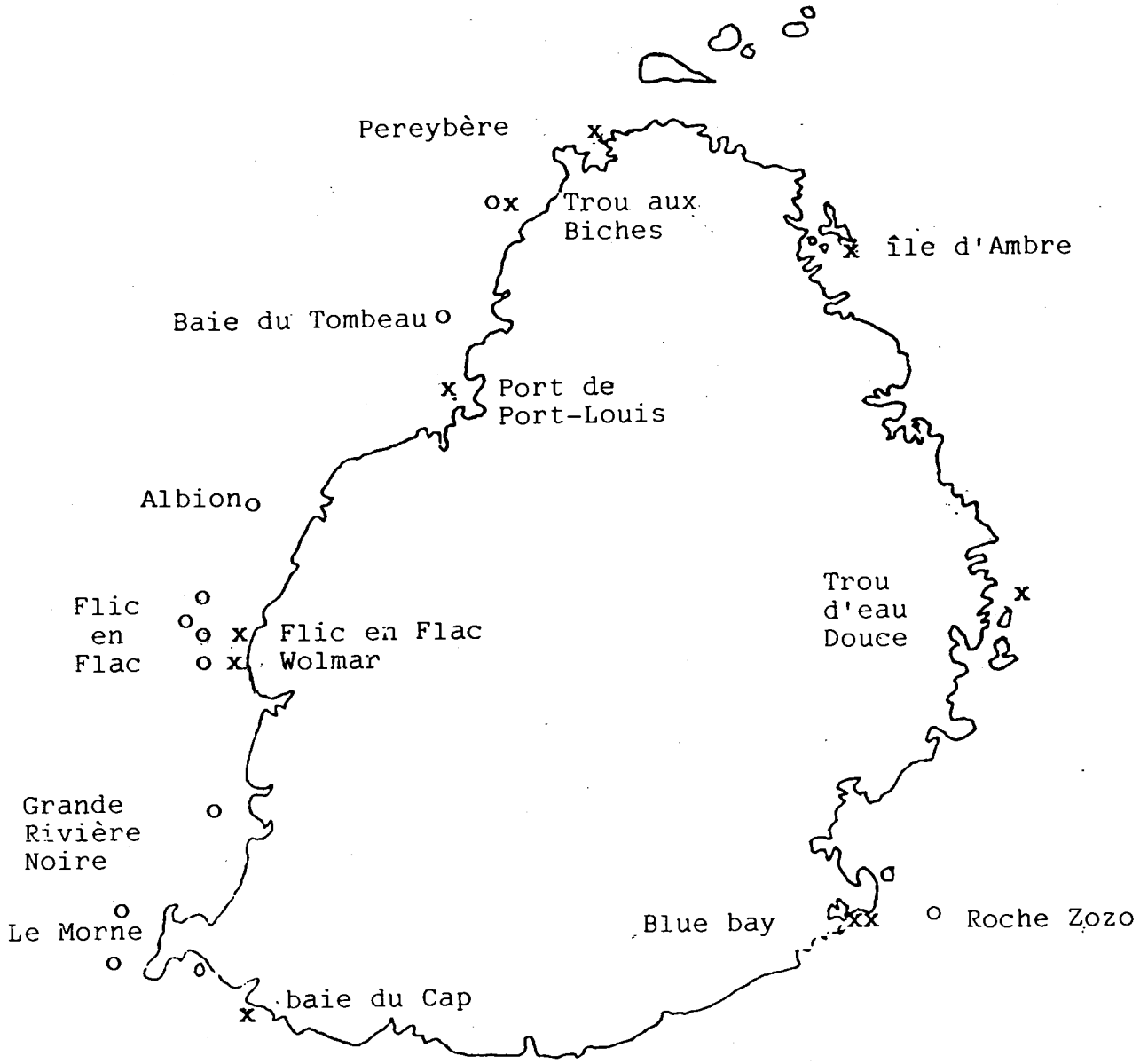


Fig. 8 – Reconnaissance préliminaire des récifs et des lagons de l'Ile Maurice - Position des sites reconnus (d'après réf. 5)

Les nombreux organismes vivants qui ont pour biotope les récifs coralliens sont des éléments indispensables de la chaîne biologique qui permet à la fois d'assurer le maintien des activités mauriciennes traditionnelles de pêche, mais aussi celui de la capacité d'auto-épuration naturelle du lagon en l'absence de fortes pollutions concentrées.

Les récifs barrière jouent également un autre rôle fondamental : ils constituent des brise-lames naturels qui absorbent une partie importante de l'énergie des houles océaniques lors du déferlement. Sans cette protection, les plages coralliennes et les installations littorales de l'île subiraient de graves et fréquents dommages lors des nombreuses perturbations cycloniques qui affectent régulièrement l'île.

3.2. LAGONS

Bien qu'ils constituent un capital important, notamment pour la pêche et les industries de loisirs et du tourisme, les lagons de l'île Maurice (tout comme les récifs barrière) n'ont fait, jusqu'à présent, l'objet que de rares études sectorielles ou ponctuelles. La superficie des lagons de l'île est estimée à 243 km^2.

La profondeur des lagons est généralement faible, comprise entre 1 et 2 m, à l'exception du grand lagon de Mahébourg-Grande Rivière du Sud-Est où elle atteint 10 à 15 m dans les chenaux intérieurs des passes, et des vasques reconnues et présentes dans quelques lagons (île d'Ambre, Rivière-du-Rempart, Rivière Noire, Blue Bay) où elle peut atteindre une dizaine de mètres.

Ces faibles tirants d'eau expliquent pourquoi les fonds sédimentaires et coralliens du lagon peuvent être profondément remaniés lors du passage de cyclones générant des fortes vagues, insuffisamment amorties par la barrière récifale externe : les vagues résultantes qui franchissent les récifs et se reforment dans les lagons les plus larges, sous l'effet du vent, peuvent ainsi transporter jusqu'aux rivages, les débris grossiers de coraux arrachés aux formations récifales.

Les fonds sédimentaires des lagons de l'île sont ainsi constitués de débris et sables coralliens et coquilliers sur des épaisseurs métriques ou plurimétriques variables.

Face aux embouchures des rivières, ainsi que dans la zone des anciens chenaux fluviatiles ennoyés, les sédiments coralliens sont très probablement mélangés, en profondeur, à des galets, sables et limons terrigènes.

Dans les zones des chenaux et des passes, où les courants sont violents en période de flot et de jusant malgré un marnage moyen faible (environ 0,20 à 0,80 m), les sédiments sont grossiers.

Les substrats meubles des lagons peuvent être recouverts des communautés d'algues suivantes (J. de B. Baissac et al, 1962) :

- pelouses de phanérogames de type Diphantera sur les sédiments sablo-vaseux, entre les niveaux de basses mers, de mortes eaux et de vives eaux;

- herbiers de cymodocées au-dessous du niveau des plus basses mers, sur les substrats sableux.

La figure 9 représente un exemple de variations dans les unités de peuplement en trois zones des lagons de l'île Maurice (M.M. Pichon, 1967).

Des colonies coralliennes de type Acropora (branchues), Montipora, Pavona (foliées), Porites (massives), Favia (encroûtantes), etc. (fig. 10) se développent sur la partie interne du récif barrière, ainsi qu'au milieu des lagons, spécialement à proximité des passes et chenaux ou sur des substrats rocheux.

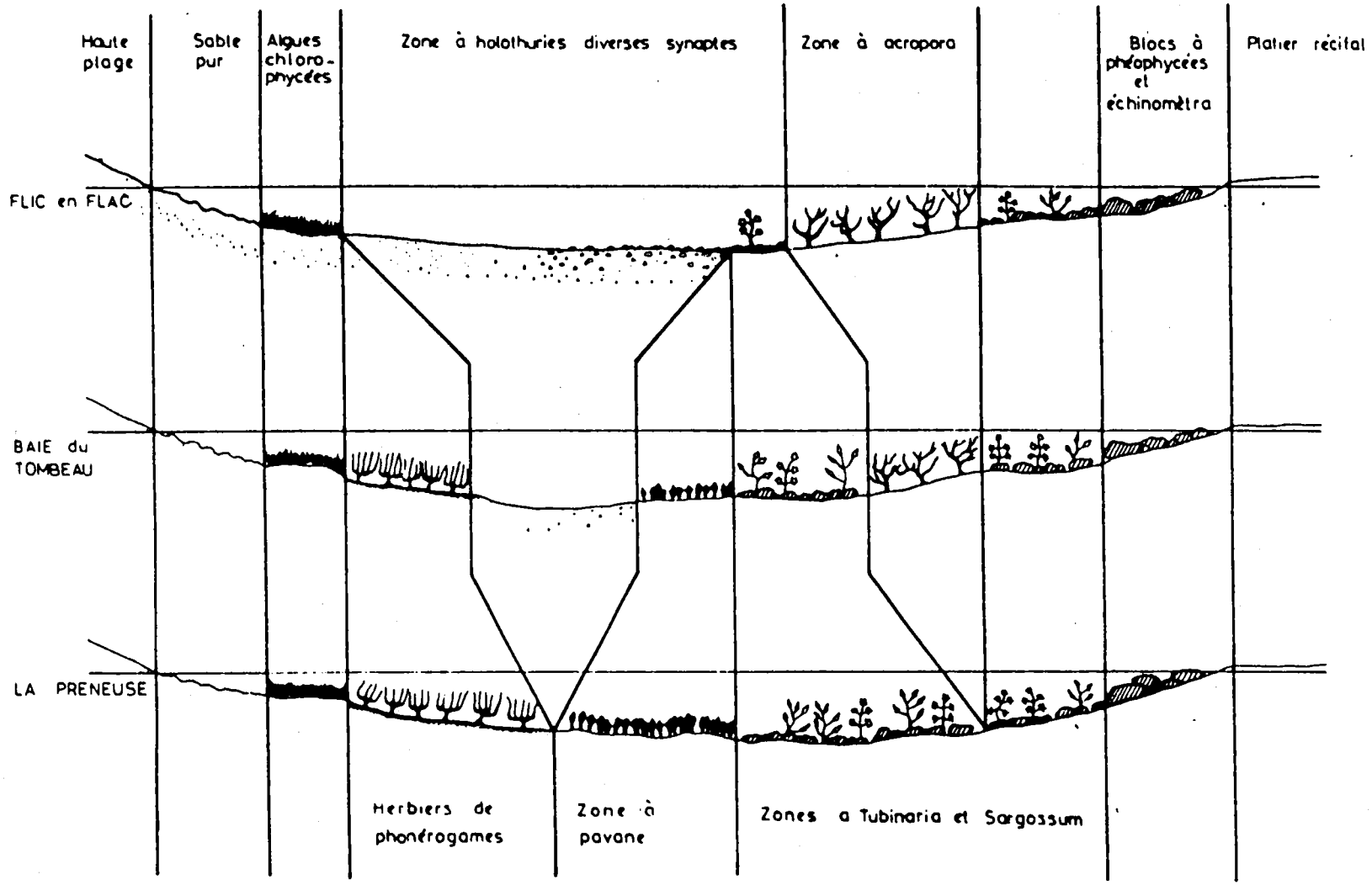


Fig. 9 - Variations dans l'extension des unités de peuplement de 3 lagons de l'Ile Maurice (d'après réf. 12)

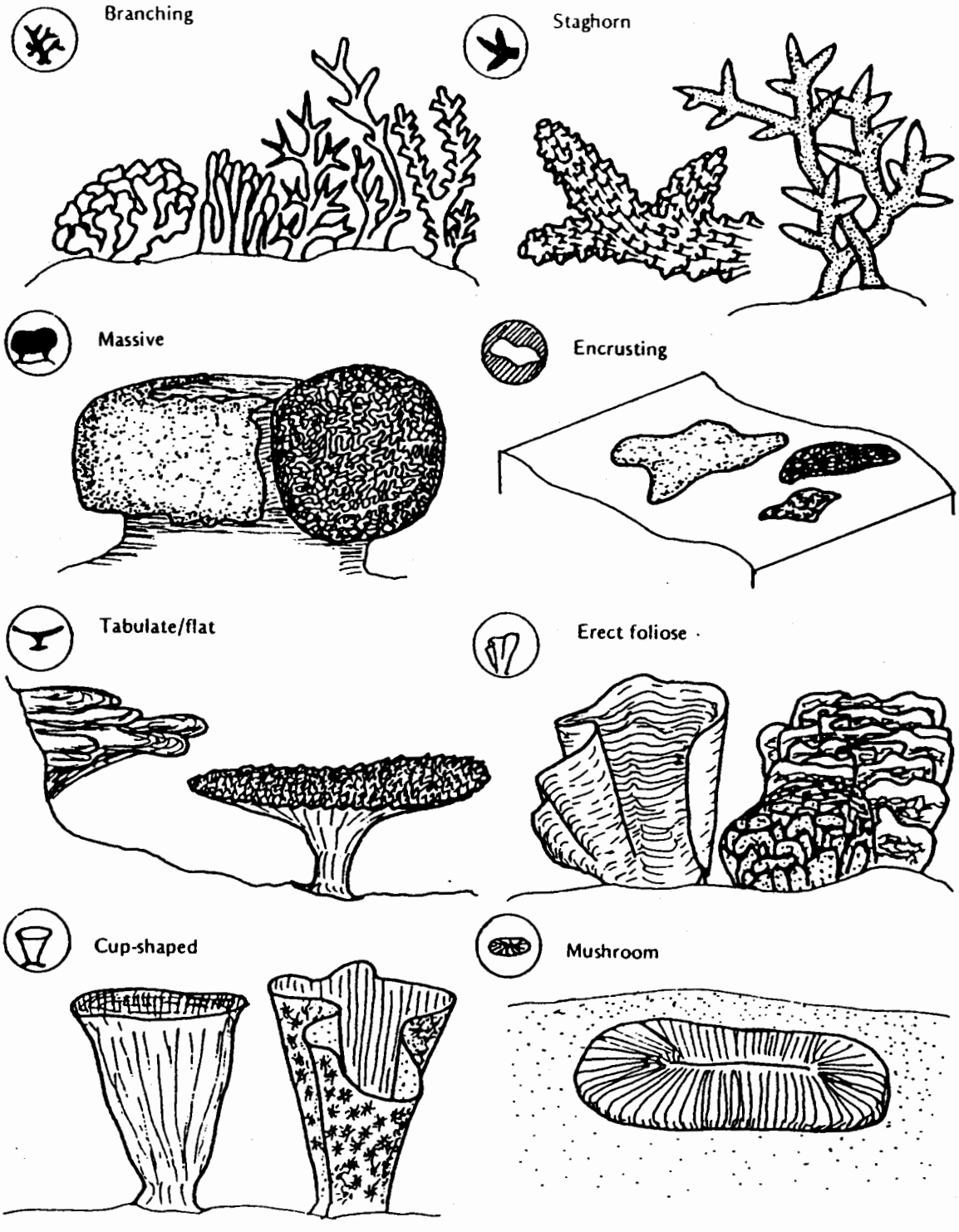


Fig. 10 - Principales formes coralliennes(d'après réf. 16)

Les fonds de corail brisé (formes arborescentes) peuvent occuper de larges surfaces en arrière du récif barrière, dans le lagon.

La diversité des peuplements lagonaires ainsi que l'état de santé du lagon, qui dépendaient, jusqu'à une époque récente, surtout de conditions naturelles (bathymétrie, hydrologie, hydrodynamique, etc.), sont aujourd'hui étroitement liés à l'activité humaine : pêche, extraction de sables et de coraux, pollutions domestique et industrielle, augmentation des apports sédimentaires fluviatiles due à la mise en valeur des terres.

D'après une récente reconnaissance préliminaire de quelques lagons (10 sites) de l'île Maurice (C.W. Gill, 1987), on retiendra les quelques faits notables suivants :

- dans la zone lagonaire influencée par les apports fluviatiles à baie du Cap et à Blue Bay (Le Chaland), il n'aurait été trouvé que de 1 à 5% de coraux vivants;

- seulement 25 à 40% de coraux vivants auraient été notés au cours des plongées à Port-Louis/Fort St George, Trou-aux-Biches, Pereybère, île d'Ambre, Trou d'Eau Douce, Wolmar, Flic-en-Flac;

- la présence de nombreux vers, Holothuries, et la croissance d'un tapis algal (algal turf) sur les sables et édifices coralliens, indiqueraient un stade de pollution organique assez avancé, notamment dans les secteurs de Wolmar/Flic-en-Flac, Port-Louis, Trou d'Eau Douce.

Cette reconnaissance d'extension limitée n'a pas permis de mettre en évidence l'impact des activités extractives (sables, corail vivant) qui affectent aujourd'hui plus particulièrement les secteurs lagonaires suivants : Mahébourg, Grande-Rivière du Sud-Est, Poste de Flacq, Rivière du Rempart.

Il serait souhaitable également qu'un prochain inventaire plus exhaustif et un suivi régulier soient réalisés, notamment dans les zones des lagons sujettes à l'influence de rejets domestiques et industriels polluants (sucreries, teintureries, industries diverses) via des émissaires ou des rivières.

Certains cas de pollution diffuse ou concentrée, tels que ceux liés à l'activité saisonnière des sucreries (Bel Ombre : cendres, résidus de bagasse, eaux chaudes) ont été récemment instruits par les organismes officiels mauriciens chargés du contrôle et de la préservation de l'environnement (T.S. Ramyead, communication orale).

4. EXTRACTION DE SABLES CORALLIENS ET DE CORAUX

4.1. EXTRACTION DE SABLES CORALLIENS

Il existe trois sources d'approvisionnement de sables coralliens à l'île Maurice, dont les deux sources principales suivantes : carrières terrestres et lagons. La troisième source, illégale et sévèrement punie par la loi, ne porte actuellement que sur des extractions marginales et furtives dans les sables dunaires et sur les hauts estrans de plage.

4.1.1. Extractions en carrières terrestres

Elles constituent actuellement, avec une production qui dépasse 300 000 t/an, la principale production de sables et débris coralliens de l'île Maurice.

Ces extractions, réalisées tout d'abord dans des petites exploitations situées sur le pourtour de l'île, dans certains massifs dunaires* et leurs arrière-plaines sableuses (voir tableau page suivante), ont été récemment regroupées dans deux secteurs principaux : Wolmar et St Félix, et deux secteurs annexes (Pointe d'Esny, Riambel).

Les extractions industrielles sur les deux sites principaux sont réalisées par la Sté United Basalt Products Ltd (UBP) qui possède aujourd'hui un quasi-monopole pour ce type de production.

Des carrières de Wolmar (photo 19, planche 10), exploitées à la pelle rétro en-dessous du niveau de la nappe phréatique, sont extraits du sable ainsi que des blocs et débris coralliens fossiles (plages anciennes) qui sont tamisés sur place, la partie grossière étant broyée à l'installation UBP de Poudre d'Or (broyeurs à barres). Les sables coralliens sont lavés pour fournir du sable de construction dans les installations de l'UBP de Poudre d'Or, Wolmar et Quatre Bornes.

Les anciennes carrières d'extraction de Wolmar font actuellement l'objet d'un remblaiement, par l'UBP, à l'aide de matériaux hétérogènes.

La carrière de St Félix, située en arrière du cordon dunaire littoral, est exploitée à sec jusqu'à une cote légèrement supérieure à celle du niveau piézométrique : les sables coralliens, bien triés dans les horizons supérieurs, renferment également, comme à Wolmar, des débris grossiers de coraux (Acroporas) dans les horizons inférieurs, ce qui témoigne de la présence de plages anciennes et de niveaux marins (Pléistocène?) plus élevés que le niveau actuel (photo 20, planche 10).

A la fin, proche, de cette dernière exploitation, les carrières seront remblayées et recouvertes par une couche de sol mise en réserve, pour être replantées en canne à sucre.

Le principe d'extraction des sables et débris coralliens en carrières terrestres apparaît donc comme une solution industrielle particulièrement rentable et conduisant à des impacts "limités" et temporaires sur l'environnement, à condition, notamment, que soient respectées les contraintes suivantes :

- interdiction d'extraire dans le cordon dunaire, qui est généralement planté de filaos et borde le littoral, ainsi qu'à l'intérieur des "pas géométriques" (domaine public);

- observations du niveau piézométrique et de ses variations saisonnières, autour et sur le site de la future exploitation, et simulation préalable du comportement de la nappe phréatique, pour prévenir tout impact négatif lié à l'ouverture de la carrière;

- mise en réserve pour réaménagement futur, du sol humifère lors de l'ouverture de la carrière;

- réaménagement contrôlé de la carrière à la fin de l'exploitation, avec réutilisation et régalage du sol mis en réserve.

On trouvera, en annexes 1 et 2, copie de deux documents d'information sur "l'effet des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraine", ainsi que sur "la remise en état des carrières à des fins agricoles".

---

*L'extraction dans les massifs dunaires est à proscrire (voir photos 17 et 18, planche 9).

ESTIMATION (*) DES TONNAGES DE SABLES ET CORAUX EXTRAITS DES PRINCIPALES CARRIERES TERRESTRES SUR LA PERIODE 1975-1984

CARRIERES	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	TONNAGE TOTAL (t)
BELLE MARE	5.120	13.440		352							18.912
LES SALINES	2.560	6.080	11.296	7.632	3.520	6.720	3.840	3.840		16	45.504
BEL OMBRE	25.600	52.160	2.560	3.840		60.320	1.984	84.480			230.944
RIAMBEL		24.000	15.360	48.480					80	1.260	89.180
BAIE DU CAP		3.200									3.200
MON TRESOR MON DESERT		3.840	21.120	10.640							35.600
ROCHES NOIRES		2.288	2.000	2.848		320				3.840	11.296
ST FELIX		48	1.712	3.040	22.240	27.504	41.280	15.120	12.240	1.260	124.444
PROVIDENCE		48									48
PALMAR			288								288
TROU AUX BICHES					32	32					64
TAMARIN						48					48
BAIE DU TOMBEAU								16			16
FORT WILLIAM						768					768
PEREYBERE										960	960
P G LA MIVOIE						256					256
POUDRE D'OR				384							384
FLIC EN FLAC										1.260	1.260
LE MORNE BRABANT									2.560		2.560
	33.280	105.104	54.336	77.216	25.792	95.968	47.104	103.456	14.880	8.596	565.732

(*) D'après Ministère du Logement, des terres et de l'environnement (données non publiées).

4.1.2. Extraction de sables dans le lagon

C'est une activité ancienne qui s'apparente plus, à l'île Maurice, à une activité artisanale de type "pêche de sable" plutôt qu'à une industrie extractive organisée. La majorité des ouvriers ("Terrassiers de la mer") qui pratiquent l'extraction de sables dans le lagon sont aujourd'hui des pêcheurs qui utilisent leurs pirogues à la fois pour la pêche traditionnelle et le transport du sable, et de jeunes manoeuvres en attente d'un travail plus rémunérateur et moins éprouvant, dans un site urbain.

L'extraction du sable est effectuée manuellement, dans les parties peu profondes et abritées des lagons, bancs de sable et fonds coralliens, sous des profondeurs d'eau inférieures à 1 m, à 1,20 m à marée basse. L'extraction du sable se fait à la pelle par 2 ou 3 "terrassiers" qui se tiennent dans l'eau et chargent leur pirogue en bois de 6 à 8 m de long. Un chargement moyen de 2 à 3 tonnes de sable requiert 1 h à 1,5 h.

Les pirogues, mues à la voile ou à la perche (rarement à moteur), sont ensuite déchargées à la pelle dans des sites de déchargement autorisés (voir annexe 3) sur le rivage. Seule l'exploitation de M. G. Lebon à Bras-de-Mer (Roches Noires) dispose, à notre connaissance, de pirogues à conteneurs métalliques amovibles dont le déchargement est facilité grâce à une petite grue (photo 22, planche 11).

D'après les données disponibles au Ministère du logement, des terres et de l'environnement, M. T.S. Ramyead a établi récemment les estimations suivantes pour les tonnages de sables coralliens extraits des lagons de l'île Maurice sur la période 1975-1984 (voir tableau page suivante).

Ces estimations ont été établies d'après le nombre de permis délivrés pour des pirogues déclarées être utilisées pour l'extraction de sable dans le lagon (taxe de 240 rs/an/pirogue), en considérant qu'à raison de 5 t/jour, chaque piroguier extrait et transporte 1 000 tonnes de sable par an, en moyenne.

Le nombre de permis (licence) délivrés par le Ministère, en 1987, pour le débarquement et le stockage du sable sur le rivage (taxes de 1 210 rs/an par licence, plus 25 rs/perche pour le site de déchargement occupé, plus taxe par pirogue), s'élève à 29 en se distribuant comme suit (fig. 11).

- Pointe des Régates (Mahébourg)	8
- Roches Noires	5
- P.G. Rivière la Chaux	4
- Grande Rivière du Sud-Est (photo 21, pl. 11)	4
- Pointe des Lascars	3
- Deux-Frères	2
- Poste de Flacq	1
- Pointe Desny	1
- Bras d'Eaux	1

A ces 29 licences sont associées 76 pirogues autorisées, ce qui conduit (sur les mêmes bases que précédemment) à une estimation prévisionnelle de 76 000 t (soit entre 50 000 et 60 000 m^3) de sables coralliens extraits des lagons en 1987.

Si l'on regroupe les chiffres précédents en fonction de la proximité des sites de déchargement, on note que ce sont les trois secteurs suivants des lagons qui sont les plus affectés par les activités de "pêche de sable" : Mahébourg, Grande Rivière du Sud-Est, Roches Noires/Rivière du Rempart.

ESTIMATION DES

TONNAGES DE SABLES CORALLIENS EXTRAITS DES LAGONS DE L'ILE MAURICE (PERIODE 1975-1984)

S I T E	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	TONNAGE TOTAL (en tonnes)
GRANDE RIVIERE DU SUD EST (G.R.S.E.)	1.600	9.100	4.000	3.300	3.600	2.400	3.600	22.800	6.000	7.100	63.500
ROCHES NOIRES						1.800		22.200		10.800	34.800
LES SALINES (GRANDE RIVIERE NOIRE)	300	1.800	500	500	1.200	2.400		2.400		1.200	10.300
TROU D'EAU DOUCE	400		100	200	1.200	1.200	1.200	1.200			5.500
MAHEBOURG	1.800	1.700			700	500					4.700
HAUTE RIVE (RIVIERE DU REMPART)	400	900						1.200			2.600
DEUX FRERES (G.R.S.E.)		2.100									2.100
POINTE LASCARS (RIVIERE DU REMPART)										1.200	1.200
BRAS D'EAU (POSTE DE FLACQ)										1.200	1.200
RIVIERE LA CHAUX (MAHEBOURG)										1.200	1.200
QUATRE SOEURS (Sud G.R.S.E.)		300									300
ANSE LA RAIE(CAP MALHEUREUX)		200	100								300
	4.500	16.100	4.700	4.000	6.700	8.300	4.800	49.800	6.000	22.700	127.600

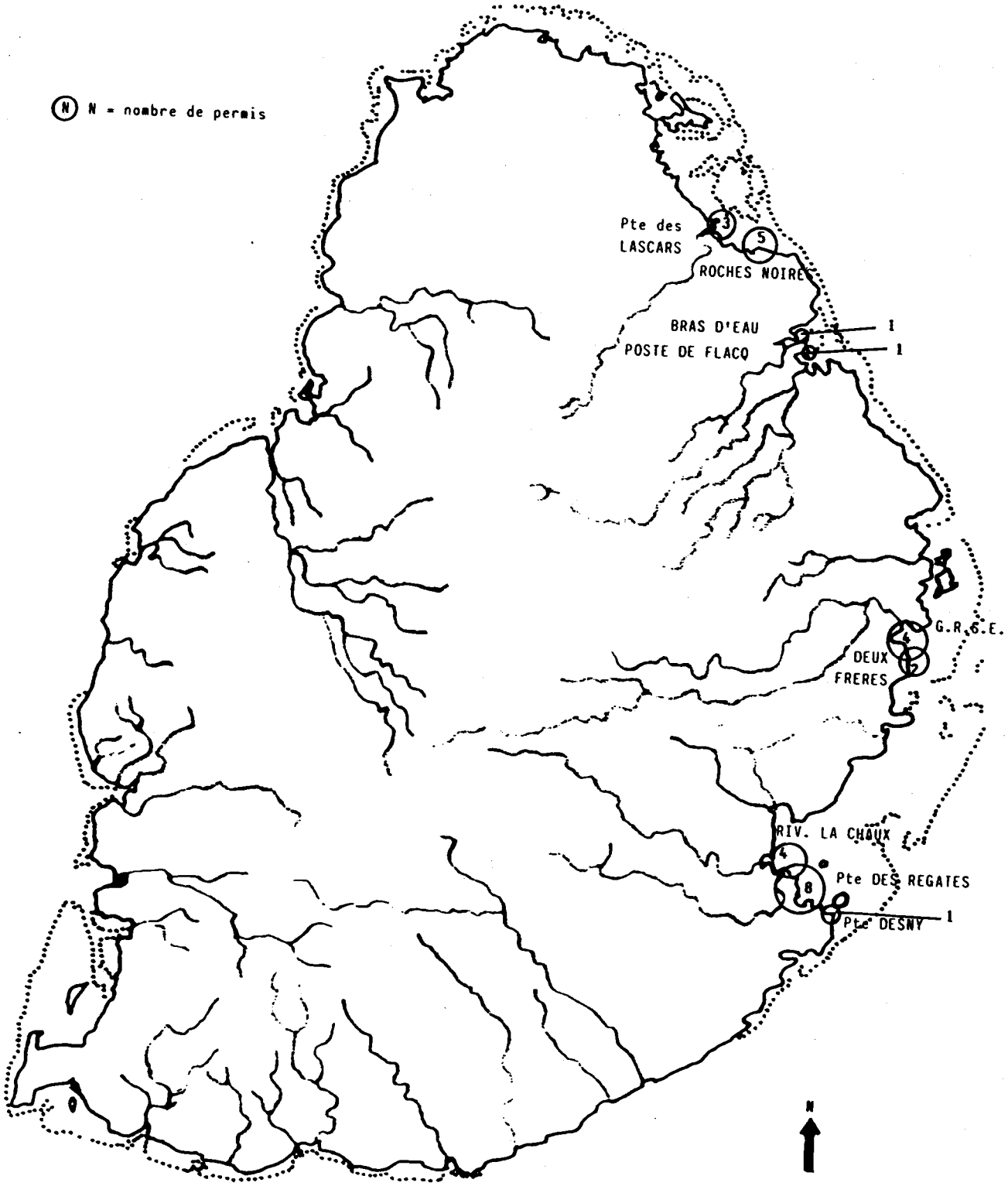


Fig. 11 - Sites d'extraction de sable dans les lagons (autorisés en 1987)

Le mode d'extraction pratiqué actuellement dans les lagons amène les pêcheurs à "ratisser" les hauts fonds, afin de diminuer la pénibilité du travail, et donc à se déplacer régulièrement. De ce fait, l'extension des zones lagonaires touchées par les extractions de sables est importante.

En effet, si l'on admet que l'extraction manuelle à la pelle se fait sur une profondeur moyenne de 0,25 m, l'extraction de 50 000 m^3/an de sables coralliens concernerait une zone lagonaire d'environ 200 ha ou 2 km^2/an.

D'une année sur l'autre, sous l'effet des transports sédimentaires dus aux vagues, notamment lors des tempêtes, les dépressions des zones exploitées tendent à se combler par apport de sables venant des zones situées alentour, ce qui augmente encore les superficies touchées par les extractions.

Parmi les principaux impacts directs des extractions dans le lagon, on peut citer : abaissement des fonds, destruction de la flore et de la faune associées aux sédiments sableux, des zones de frayère, etc.

Comme impacts indirects on peut mentionner la compétition entre extraction et activité de pêche, avec réduction des prises, le risque d'érosion des plages proches des sites d'extraction, la réduction de la diversité biologique, la nécrose des coraux due à une augmentation de la turbidité de l'eau lors de la remise en suspension des sédiments fins.

Le souhait, de quelques exploitants et industriels, de mécanisation et de développement des activités extractives dans certains lagons, pose le problème de la possibilité d'identifier, limiter et contrôler les impacts négatifs précédents, ce qui nécessite une réflexion préalable et des études interdisciplinaires approfondies, avant de pouvoir statuer sur ces demandes.

Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre 5.

4.2. Extraction du corail et fabrication de la chaux

Si les coraux ont été utilisés à l'île Maurice pour la construction, et font toujours l'objet de prélèvements pour la fabrication artisanale de bijoux et la vente aux touristes, le problème majeur, aujourd'hui, demeure l'extraction des coraux pour l'industrie de la chaux.

Cette industrie artisanale mettait en oeuvre, au début du siècle, plus d'une centaine de fours à chaux disséminés sur le pourtour de l'île. Vers 1959, quarante-cinq fours à chaux étaient encore en opération. Aujourd'hui, d'après un recensement effectué par le Ministère du logement, des terres et de l'environnement (T.S. Ramyead, 1982-83), sept usines de production de chaux sont en fonctionnement (fig. 12) :

- Mahébourg Lime Co. à Ville Noire/Mahébourg (S.E.),
- Bel Air-St Félix Lime Co. à Bel Air-St Félix (S),
- Auville Lime Factory à Pointe aux Sables (N.O.),
- Haute Rive Lime Factory à Mon Loisir (S.E.),
- Beau Champ Lime Factory à Beau Champ (E.),
- Roche Bois Lime Factory à Roche Bois (N.O.),
- Baie du Tombeau Lime Factory à Baie du Tombeau (N.O.)

L'ensemble de ces usines emploie directement environ 150 personnes et 50 à 70 personnes de plus pour la récolte du corail, des calcaires de carrière (Mahébourg) et leur transport.

La "pêche au corail" dans le lagon est effectuée à partir de pirogues de 6 à 8 m de long, identiques à celles utilisées pour la pêche traditionnelle et la "pêche au sable". Le corail (mort ou vivant) est collecté à l'aide de gaffes à crochet ou de pinces, les pêcheurs sélectionnant de préférence les coraux tabulaires en forme de vasques ou parasols de type Acropora S.P., appelés localement "platin", qui ont un bon rapport poids/volume et qui peuvent être extraits, cassés et stockés facilement (voir photos 23 et 24, planche 12).

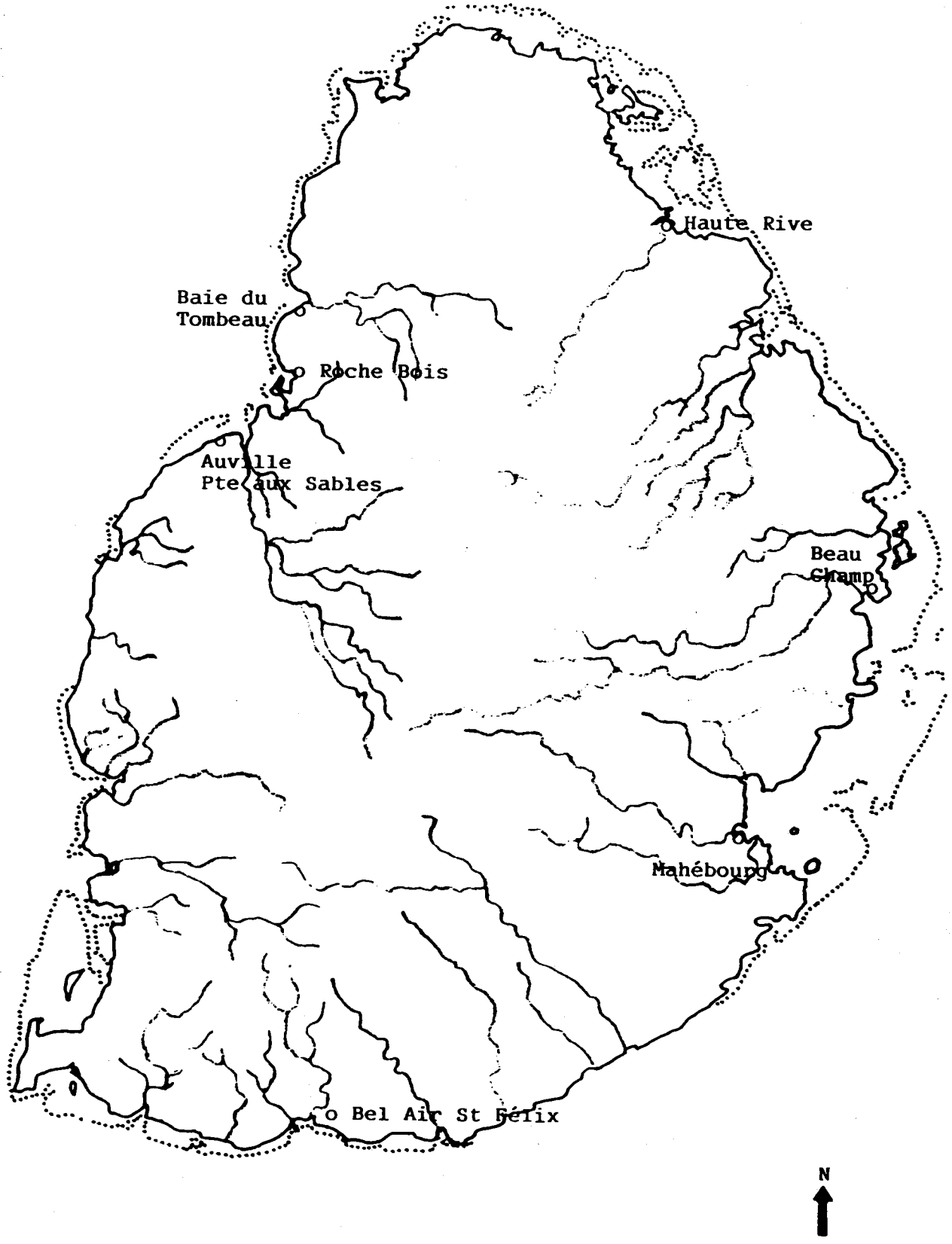


Fig.12 - Usines à chaux en activité

Les pêcheurs de coraux ne font pas la distinction entre coraux vivants, nécrosés ou morts et une partie importante (fait que nous avons constaté) de l'extraction de corail pour les usines à chaux porte sur le corail vivant, ce qui est très préjudiciable aux biotopes et à l'équilibre écologique.

Dans certains secteurs de l'île (Port-Louis, Poudre d'Or-Rivière du Rempart), l'extraction du corail, à l'aide de barres de fer, a eu lieu et se poursuit encore directement sur les récifs barrière ou récifs coralliens intérieurs avec, notamment, pour conséquences directes, la destruction partielle des édifices coralliens et la réduction de leur efficacité comme "brise-lames" naturels.

Les débris coralliens de grande taille extraits des carrières de sables terrestres (Wolmar, St Félix) servent également de matériaux de base pour la fabrication de la chaux.

Une seule usine de production de chaux, celle de Mahébourg, utilise à la fois les matériaux rocheux calcaires (Eolianites) extraits d'une carrière terrestre (Salle d'Armes-Vieux Grand Port, voir photo 16, planche 18), et du corail marin, dans des proportions incontrôlables et mal connues qui semblent varier entre 10-90% et 70-30%.

D'après des données récentes disponibles (T.S. Ramyead, 1983), on peut estimer que la production actuelle de chaux de l'île Maurice est de l'ordre de 8 000 t/an (dont environ 85% pour l'usine de Mahébourg), ce qui nécessite environ 13 000 t/an de matériaux calcaires de base (corail et calcaire terrestre type Eolianite).

Les tonnages de coraux utilisés pour l'industrie mauricienne de la chaux peuvent être estimés comme suit, pour les diverses usines de l'île :

Usines de chaux	Corail utilisé (t/an)
Mahébourg	2 000 à 5 000
Auville	1 000
Beau Champ	800
Haute Rive	600
Bel Air	400
Roche Bois	200
Baie du Tombeau	30 à 50

Le tonnage de corail utilisé varie donc entre 5 000 t et 8 000 t/an, sans qu'il soit possible de faire précisément la part entre corail fossile (carrières de sables terrestres), corail mort et corail vivant.

D'après les avis recueillis et ce que nous avons pu constater durant la mission d'expertise, il semble que l'on peut raisonnablement estimer à plus de 2 000 t/an la quantité de coraux vivants extraits du lagon pour la fabrication de la chaux.

Si nous prenons comme hypothèse que le corail vivant extrait est de type "platin", d'épaisseur moyenne de 2 à 4 cm et de densité sèche 1,4, 2 000 t de coraux représenteraient une surface jointive de 35 à 70 ha de vasques coralliennes.

Compte tenu de la densité de peuplement du "platin", cette simulation conduit à estimer à environ une centaine d'hectares, soit environ 1 km^2/an, la superficie de coraux détruits annuellement dans le lagon pour la fabrication de la chaux.

Rappelons que la superficie totale estimée des lagons qui entourent l'île Maurice est de 243 km^2.

Les estimations précédentes indiquent clairement qu'une telle exploitation, même artisanale, est incompatible avec la survie des peuplements coralliens qui conditionnent l'équilibre biologique du lagon et qu'elle est intolérable.

Une telle exploitation de coraux vivants doit être rapidement proscrite grâce à la mise en place d'un règlement spécifique et de contrôles stricts (voir chapitre 6).

5. UTILISATION DES MATERIAUX ET ALTERNATIVES

5.1 SABLES CORALLIENS

5.1.1 Principales utilisations

Elles ont été répertoriées récemment (T.S. Ramyead, non publié), grâce à un travail préliminaire de compilation du Ministère du logement, des terres et de l'environnement. Les principales utilisations et une estimation parfois grossière des tonnages annuels nécessaires sont indiquées ci-après :

- travaux de construction
  (logements individuels, immeubles,) ..... 200 000 t/an
- amendements calcaires (Mauritius Sugar Association
  et autres planteurs) ..... 60 à 80 000 t/an
- Central Water Authority (CWA)
  - filtres ..... 5 à 10 000 t/an
  - construction réservoirs et tuyaux ..... 13 000 t/an
- autorités locales (construction et usages divers) ... 15 000 t/an
- Central Housing Authority (construction
  de logements, etc.) ..... 15 000 t/an
- Ministry of works (travaux divers) ..... 10 000 t/an

D'après ces estimations, la consommation actuelle de sables coralliens à l'île Maurice est comprise entre 320 000 et 340 000 t/an. Les deux sources de matériaux sont les sables et débris coralliens extraits des carrières terrestres et du lagon.

5.1.2. Possibilités de substitution

5.1.2.1. Matériaux de construction et de travaux publics

Ils constituent l'essentiel (70 à 80 %) des sables coralliens extraits et utilisés à l'île Maurice, pour les principaux usages suivants : bétons, enduits de façade, coussin drainant pour pose de tuyaux et de câbles.

Pour l'usage de coussins drainants en tranchées, le sable corallien peut être remplacé, sans problème, par des sables et graviers basaltiques issus de concassage (rock sand).

Pour la fabrication du béton dans les bâtiments construits par des entreprises, la tendance actuelle est l'utilisation d'un mélange de 50 à 60 % de sable basaltique et de sable corallien lavé. Pour le béton de travaux publics, cette proportion peut atteindre 100 % de sables et graviers basaltiques.

Les petites entreprises et les artisans continuent à utiliser le sable corallien pour la fabrication du béton et des enduits pour les raisons suivantes :

- meilleure ouvrabilité et moindre fissuration (retrait) de ce type de béton;

- accélération de la prise due au faible pourcentage de sel contenu dans le sable corallien, insuffisamment lavé;

- difficulté d'approvisionnement en sables basaltiques à la saison des pluies, et lors des périodes de gros projets de travaux publics;

- habitudes, manque d'information.

Le sable basaltique, moins coûteux (75-80 rs/t au lieu de 95 à 100 rs/t pour le sable corallien lavé) offre l'avantage de permettre de confectionner des bétons plus "durables" et des enduits sans efflorescence qui fixent mieux les plâtres et les peintures : il serait bon de rappeler que les constructions béton faites à partir de sables coralliens peu ou mal lavé, ménacent "ruine" au bout d'une vingtaine d'années (voir le cas des bâtiments construits par les sociétés sucrières dans les années 1960).

Le remplacement progressif, par du sable basaltique, de 50 à 60% des tonnages actuels de sables coralliens utilisés en construction et en travaux publics apparaît donc possible et souhaitable dans un délai qui pourrait être fixé à 5 ans. Cela conduirait à réduire la production de sables coralliens d'environ 150 000 t/an.

5.1.2.2. Sables coralliens utilisés en filtres et amendements calcaires

Les amendements calcaires par épandage de sables coralliens dans les champs de cannes et autres cultures vivrières ont notamment pour objectif de diminuer l'acidité des sols (pH de 4 à 5,5), afin d'améliorer le rendement des engrais et la productivité des sols.

Des recherches à effectuer, notamment par le MSIRI et l'Université, permettraient peut-être de réduire les tonnages d'amendements calcaires à l'hectare, en les adaptant aux divers types de sols, de cultures et d'engrais disponibles.

Pour les filtres de sables coralliens utilisés dans le traitement de l'eau potable, il est possible d'envisager de mélanger sables coralliens et sables basaltiques dans une proportion à définir après études, et de rajouter certains produits chimiques de traitement.

Le développement de la recherche et de l'utilisation des eaux souterraines, naturellement filtrées, devrait également permettre de réduire les quantités de sables utilisées pour filtrer les eaux superficielles.

Il est donc possible d'envisager de pouvoir réduire globalement de 20 à 30 % les tonnages de sables coralliens utilisés pour les deux usages précités, soit d'environ 15.000 tonnes/an.

5.2 LES COROUX

La chaux et ses résidus de fabrication sont principalement destinés, à l'île Maurice, aux usages suivants :

- traitement des jus de canne (0,6 à 0,7 kg de chaux par tonne de canne broyée) ;
- bâtiment et peintures (pigments) ;
- amendements calcaires et aliments pour le bétail (résidus de fabrication).

La chaux est obtenue par chauffage de carbonate de calcium (Ca CO3) contenu dans le corail (Aragonite), les roches et sables calcaires, selon l'équation de base suivante :

$$Ca\ CO3 \rightleftharpoons CaO + CO2$$

Selon certaines analyses comparatives disponibles (C.E.F. Williams, 1956) ; P.C. Wright, 1967), le pourcentage de Ca CO3 contenu dans les roches calcaires des dépôts terrestres de Salle d'Armes et de Pointe Corail de la Prairie, serait de 0,55 à 0,56 contre 0,53 à 0,54 pour le corail extrait du lagon, et 0,51 à 0,52 pour les sables coralliens.

On en déduit directement que le meilleur rendement théorique pour la production de la chaux résulte de l'utilisation des roches calcaires (Eolianites et coraux fossiles) extraites des carrières terrestres, dont les réserves (à préciser) semblent suffisantes pour couvrir les besoins de plusieurs décennies (voir fig. 5).

On peut donc envisager, sans réduire la production actuelle de chaux, d'interdire l'extraction de coraux dans les lagons et de remplacer ce matériau par des roches calcaires ou les débris coralliens les plus grossiers issus de l'extraction de sables coralliens dans des carrières terrestres.

Il existe, par ailleurs, sur l'île de Rodrigues (P. de Blic, 1986), des dépôts terrestres considérables (qui dépassent 50 à 60 m de puissance) et très peu exploités (fabrication manuelle de blocs pour la construction) de calcarénites, qui pourraient également être utilisés pour la production de chaux, d'aliments pour bétail et d'amendements calcaires.

5.3 RECAPITULATIF : EVOLUTION DES EXTRACTIONS ET CONSEQUENCES

Nous avons pu estimer précédemment qu'il était possible et souhaitable :

- d'arrêter totalement l'extraction de coraux dans les lagons, sans nuire à la production de chaux nécessaire à l'économie mauricienne;

- de réduire progressivement (sur 5 ans) d'environ 160 000 tonnes l'extraction et l'utilisation annuelles de sables coralliens;

- de remplacer ce tonnage par du sable basaltique issu du concassage des meules de basalte (qui occupent encore quelques pour cent des surfaces cultivables), et de roches massives à extraire de nouvelles carrières, plus faciles à exploiter industriellement.

Il reste néanmoins un tonnage qui paraît relativement "incompressible" à court terme d'environ 150 000 t/an de sables et débris coralliens à extraire, soit de carrières terrestres, soit des lagons.

On peut donc récapituler, dans le tableau de la page suivante, l'évolution souhaitable des extractions annuelles de coraux, sables coralliens et des productions de sables basaltiques.

Les évolutions précédentes auront notamment pour conséquences favorables de réduire progressivement et à court terme, la pression et les impacts négatifs qui s'exercent aujourd'hui sur les milieux lagonaires et récifaux, du fait des diverses extractions : il est, en effet, possible et souhaitable, sans risque pour l'économie et le développement de l'île Maurice, de réduire à zéro sur une période de 5 ans, toute extraction de sables dans les lagons, et d'interdire l'extraction du corail dans les lagons et sur les récifs barrière.

Une telle évolution donnera lieu, également, à une réduction des extractions de sables et coraux fossiles dans les carrières terrestres, ce qui limitera la compétition et les conflits d'usage de l'espace dunaire entre producteurs de matériaux, planteurs, agriculteurs, usagers et habitants.

Par contre, cette évolution ne sera rendue possible que grâce à l'identification et à la mise en exploitation de nouvelles carrières terrestres de roches massives (calcaires, basaltes) et à une augmentation significative des capacités d'extraction et de transformation (concassage) des industries extractives.

En effet, la production de sables et agrégats basaltiques est assurée pour l'essentiel par une demi-douzaine de sociétés privées, dont l'U.B.P., qui réalise = 80 à 85% de la production annuelle, qui doit se situer entre 420 000 et 450 000 t/an.

Le matériau de base pour cette production provient du concassage (photo 26, planche 13) des blocs qui constituent les "meules" pyramidales de basalte qui parsèment les surfaces cultivées de l'île.

L'enlèvement de ces blocs n'est généralement réalisé qu'après les récoltes ou avant les plantations, et pose problème pour les engins mécaniques en période de pluie (photo 25, planche 13). En plus de ces contraintes, les gros chantiers de travaux publics (chantiers routiers, liaison routière Port Louis/Mahébourg,) sont de gros utilisateurs d'agrégats, ce qui occasionne des périodes de "pénurie" et une certaine pression de la demande sur les prix de vente.

La période de 5 ans que nouss suggrérons de retenir pour mener à bien cette évolution, tient compte de ces impératifs techniques et financiers, mais aussi de la durée nécessaire à la reconversion des pêcheurs de sables et de coraux et au changement des mentalités et habitudes des utilisateurs de matériaux.

EVOLUTION PREVISIONNELLE SOUHAITABLE DES EXTRACTIONS

MATERIAUX (Usages)	SITUATION ACTUELLE (1987)	SITUATION FUTURE (1990-1992)
Coraux vivants extraits des lagons (chaux)	2 000 t	0
Débris coralliens fossiles :		
- chaux	3 000 à 6 000 t	3 000 t
- filtres et amendments calcaires	70 000 à 90 000 t	50 000 à 70 000 t
Roches calcaires (chaux)	5 000 à 8 000 t	10 000 t
Sables calcaires (construction)	250 000 t	90 000 t
Sables basaltiques (construction et travaux publics)	250 000 t	420 000 à 450 000 t

5.4 PROJETS DE CIMENTERIE

De nombreux rapports pour des projets d'implantation de cimenteries industrielles à l'île Maurice ont vu le jour depuis les premières investigations du Colonial Geological Surveys (C.E.F. Williams, 1956).

Les importations mauriciennes de ciment Portland ont évolué de la façon suivante sur la période récente :

- 1978 : 294.000 t
- 1982 : 210.000 t
- 1984 : 187.000 t

Les capacités de production proposées dans ces divers projets sont de l'ordre de 100 à 120 000 t/an.

Parmi les sources de matériaux envisagées pour la fabrication du ciment, on trouve, notamment :

- sables coralliens (Wolmar), argiles (Midland/Mt Laselle) et cendres de bagasse (Williams, 1956);

- sables coralliens (lagon Port Louis), trachytes, tufs (Belle Rive) ou andésites-trachytes-tufs (Mt Camisard, montagne Blanche), basaltes et sables silicieux (UNIDO, 1972);

- sables coralliens (lagon Mahébourg), trachytes (Mt Camisard), sables silicieux et gypse (T.C.E., 1982).

Les récents projets de cimenterie avec implantation à Port Louis ou Mahébourg, impliqueraient une extraction de sables coralliens dans les lagons d'environ 150 000 t/an pour une capacité de production de 100 000 t de ciment/an.

Avant de prendre position sur de tels projets industriels, il apparaît nécessaire de réaliser des études détaillées portant notamment sur :

- l'evaluation des ressources exploitables : bathymétrie, sismique, sondages carottés, prélèvement et analyses;

- le choix des zones potentiellement exploitables;

- les modes d'exploitation possibles;

- l'état initial et prévisible (pendant et après l'exploitation) des sites qui pourraient être exploités, et les impacts sur le littoral, le lagon et les bioconstructions récifales.

La quasi-totalité des rapports de faisabilité technique que nous avons pu consulter passent sous silence ou négligent les impacts prévisibles de l'extraction des sables dans le lagon, alors que de nombreux contre-exemples avec effets négatifs et quasi-irréversibles à l'échelle humaine, sont disponibles dans la littérature.

Il ne s'agit pas de "geler" une situation en voulant à tout prix conserver l'état "actuel" de certains milieux lagonaires et récifaux; il faut, au contraire, se donner les moyens d'évaluer un projet de développement et ses conséquences, afin de permettre une prise de décision établie sur des faits et des données objectives dont le recueil et l'analyse par des équipes pluridisciplinaires (écologie, biologie, sédimentologie, hydrodynamique) demandent une à deux années.

Il est possible, bien que très incertain que les impacts liés au dragage de sables coralliens et à l'approfondissement de certains lagons très peu profonds (pointe Corail, Bel Ombre, Riambel), soient jugés, sur les résultats de telles études, "acceptables" par les usagers de ces lagons, les responsables techniques et les décideurs : la démonstration reste à faire, et la période de 5 ans que nous avons proposée pour réduire progressivement les extractions dans le lagon doit être mise à profit par les autorités mauriciennes, pour développer l'état des connaissances fondamentales, la maîtrise de ce milieu, et pouvoir juger du caractère "d'utilité publique" de certains dossiers particulièrement "sensibles".

6. PROTECTION ET GESTION DU LITTORAL ET DES LAGONS

6.1 INTERACTIONS ENTRE LES MILIEUX

Le caractère insulaire de Maurice se traduit, au plan de l'environnement, par des échanges et des interactions entre les milieux continental, littoral, lagonaire et récifal.

Le domaine continental agit sur les systèmes aval, par l'intermédiaire des flux (liquides, sédimentaires, pollution) qu'il libère. La conservation du lagon sous-entend la possibilité de contrôle et de régulation de ces flux.

La stabilité du littoral peut être affectée par des interventions humaines incontrôlées sur le rivage (construction anarchique d'épis, ouverture de graux,), mais aussi par des extractions de sables et de coraux dans le lagon, sur les barrières récifales.

L'équilibre des milieux lagonaire et récifal dépend à la fois des conditions naturelles d'évolution de ces milieux (climat, tempêtes,) et des actions anthropiques menées sur l'île (érosion des sols due au déboisement, pollutions domestiques et industrielles,), sur le rivage (disfonctionnement des systèmes d'assainissement des hôtels,) et dans le lagon (extractions, rejets, pêche à la dynamite,).

Il est donc tentant, partant d'un objectif initial lié à la gestion des ressources en sables et coraux, d'élargir cet objectif en proposant une panoplie de moyens complémentaires qui permette de mieux connaître, protéger et gérer, à la fois les milieux littoral, lagonaire et récifal.

6.2 MOYENS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Ils doivent permettre de dresser un inventaire des ressources, des milieux, des caractéristiques de leur état actuel et des interactions grâce, notamment, aux actions suivantes :

- inventaire des ressources en matériaux coralliens, calcaires et basaltiques exploitables;

- inventaire des principales sources de pollutions avec caractéristiques des rejets dans les réseaux hydrographiques, les karsts, sur le littoral et dans le lagon;

- mesures et estimations des apports sédimentaires de crue par les rivières dans le lagon, et lutte contre l'érosion dans les bassins versants;

- identification des caractéristiques morphologiques et sédimentologiques du littoral, suivi de son évolution, repérage et caractérisation des structures artificielles implantées sur le littoral;

- étude des milieux lagonaire et récifal (bathymétrie, sismique, sédimentologie, hydrologie, faune, flore,) et implantation de stations de référence pour le suivi régulier de leur évolution;

- réalisation de banques de données informatisées sur les caractéristiques et l'état de l'environnement.

Ces inventaires et études devraient pouvoir être réalisés à l'occasion d'un programme sur cinq ans associant les structures techniques responsables des problèmes d'environnement et de gestion des ressources et les universités mauriciennes, à des partenaires (organismes d'étude et de recherche, universités) extérieurs.

Un tel programme pluridisciplinaire devrait pouvoir recevoir le soutien financier des Nations-Unies, ainsi que d'organisations de coopération multilatérale et/ou bilatérale : voir le projet d'assistance présenté dans un rapport annexe.

6.3 MESURES LEGISLATIVES ET REGLEMENTAIRES

Le "Romoval of sand Act" (15.10.1975) traite, en principe, le corail comme du sable et autorise, sous réserve d'obtention d'une licence, toute personne à extraire du corail dans le lagon.

Ainsi que nous l'avons suggéré, il est souhaitable que cet acte législatif soit modifié afin d'éviter la "confusion" entre sable et corail, et de permettre l'interdiction de l'extraction du corail dans le lagon et sur les récifs coralliens.

En ce qui concerne l'extraction de sables coralliens dans le lagon et leur stockage sur le littoral (sand landing places), il est souhaitable que la reconduction des permis délivrés soit annuelle et que les périmètres d'extraction fassent l'objet, avant l'octroi du permis, d'une reconnaissance préalable (état initial) et soient effectivement balisés comme le prévoit la loi, afin de permettre les contrôles nécessaires.

Vis-à-vis des règles de construction sur le littoral, de la pollution par rejets diffus et concentrés (rivières, lagons) et de leur contrôle, il semble que les textes législatifs et réglementaires disponibles demanderaient à être revisés et adaptés afin, notamment :

- de pouvoir interdire et faire détruire toute construction non autorisée sur le littoral ou dans la zone des "pas géométriques" (domaine public);

- de prévenir, mieux contrôler et réduire les rejets de polluants dans les réseaux hydrographiques, karstiques et les lagons (Rivers and canals Act, 1983).

Les procédures classiques de type "études d'impact" devraient pouvoir être appliquées à l'île Maurice à tout projet susceptible d'altérer l'équilibre des milieux support du projet et des milieux aval.

Sans doute serait-il souhaitable qu'une législation spécifique, adaptée à la conservation et à la gestion des milieux littoral et lagonaire, puisse voir le jour prochainement à l'île Maurice, afin de concilier équilibre du milieu naturel et développement économique et touristique.

6.4 MESURES ADMINISTRATIVES

Elles doivent accompagner les mesures législatives et réglementaires.

Une mesure essentielle devrait consister à doter les services techniques des ministères et les établissements (type Central Water Authority - CWA) chargés de la gestion des ressources et de la préservation de l'environnement, de moyens en personnels compétents et en équipements adéquats, pour les opérations nécessaires d'inventaires, de mesures et de contrôles.

Sans ces moyens, les mesures précédentes sont de peu d'utilité. Il importe, en effet, de faire respecter lois et réglements grâce à des mesures administratives de type enquêtes publiques, études d'impact, autorisations préalables, contrôle des travaux, remise en état de sites dégradés, démolition d'ouvrages non autorisés, amendes et peines judiciaires, etc.

6.5 MESURES PARAFISCALES

La création, comme en France, d'une taxe parafiscale sur les matériaux extraits des carrières terrestres et marines, pourrait représenter une incitation et aide complémentaire pour la reconversion des activités extractives et la mise en oeuvre des moyens proposés en 6.2., 6.4. et 6.6.

Le montant et la gestion de cette taxe pourraient être établis par un "Comité de gestion" de la taxe qui réunirait des représentants des administrations, des extracteurs et des utilisateurs. Le taux de cette taxe, pour être incitatif, pourrait s'établir autour des valeurs suivantes :

- 8 à 10 rs/t pour les sables et débris coralliens,
- 3 à 5 rs/t pour les agrégats basaltiques et calcaires.

A titre de comparaison, le taux de cette taxe était, en France, de 0,05 F/t en 1986.

6.6 INFORMATION ET FORMATION

Les actions de sensibilisation et d'information concernent à la fois les utilisateurs des sables et coraux, ceux dont l'activité régulière est basée sur la valorisation des ressources du littoral et du lagon (pêcheurs, hôteliers, commerçants,), et le public.

Ces actions pourraient porter sur l'intérêt communautaire et la nécessité de préserver l'environnement et d'utiliser rationnellement les ressources naturelles (espaces, eaux, sables, corail, poissons,), en mettant en évidence les interactions entre les milieux (S 6.1.) et les dommages actuels et prévisibles.

Les médias (journaux, radios, télévisions) devraient permettre une sensibilisation progressive du public, tandis que les groupes socio-professionnels (enseignants, architectes, constructeurs, hôteliers, pêcheurs,) pourraient participer à un travail plus profond d'information.

Enfin, la formation des techniciens des services administratifs et para-administratifs devrait pouvoir être réalisée à l'île Maurice, à l'occasion de sessions régulières de quelques jours, et à l'Etranger, à l'occasion de stages de quelques mois dans des organismes compétents : voir projet d'assistance dans un rapport annexe.

7. CONCLUSIONS

L'île Maurice, bien qu'étant un petit territoire dans l'océan Indien, possède de nombreux atouts dont, notamment :

- une population multi-raciale nombreuse (environ 1 million d'habitants), bien scolarisée, dynamique et accueillante;

- des structures de production agricole (canne à sucre, thé) efficaces et appuyées sur des centres de recherche (MSIRI, université) réputés;

- un fort taux de croissance récent dans les domaines industriel et commercial, favorisés par la création de "zones franches" (1970) et l'accès à de nombreux marchés dont ceux de la C.E.E., via la convention de Lomé;

- des espaces naturels pittoresques et variés (montagnes, littoral, lagon) qui attirent de nombreux touristes (170 000 visiteurs en 1986) et font de l'industrie touristique la 3ème activité économique de l'île.

Ce développement rapide comporte des risques liés aux impacts négatifs de nombreux projets insuffisamment maîtrisés sur le milieu naturel.

Des conflits d'usages et d'intérêts, autrefois latents, apparaîssent aujourd'hui entre le public et certaines catégories socio-professionnelles (pêcheurs, extracteurs de matériaux, promoteurs, industriels); une partie des touristes se plaint ouvertement des atteintes à l'environnement mauricien : pollution apparente, dépôts sauvages d'ordures, dégradation des fonds coralliens.

L'essentiel du rapport a été consacré à la présentation et à l'analyse de données sur l'environnement côtier de l'île Maurice, les ressources et extractions de matériaux, leurs usages, et les possibilités de substitution (alternatives).

Des recommandations sont faites sur les moyens (scientifiques et techniques, législatifs et réglementaires, administratifs, parafiscaux, information et formation) à promouvoir pour permettre une meilleure protection et gestion du littoral et des lagons.

Nos propositions conduisent, notamment, à la mise en oeuvre et à l'intégration de moyens spécifiques aux politiques de gestion des eaux (intérieures et marines) et des sédiments (annexe 4).

Pour ce faire, il nous apparaît souhaitable de mettre sur pied, si possible dès 1988, grâce à des financements à rechercher auprès du gouvernement mauricien, des Organisations des Nations-Unies et des agences de coopération multi et/ou bilatérale, un projet d'assistance scientifique et technique auprès du MLTE/MHLE.

Les bases d'un tel projet sont proposées dans un rapport annexe.

LISTE DE REFERENCES

Baissac J.B. (de) et al. (1962) - Les biocénoses benthiques littorales de l'Ile Maurice. Revue de travaux de la station marine d'Endoume, bull. 25, fasc. 39. (Réf. 1).

Battistini R. (1970) - Etat des connaissances sur la géomorphologie de l'Ile Maurice - Madagascar. Revue de géographie n° 17. (Réf. 2).

Blic P. (de)- (1986) - Les sols de l'Ile Rodrigues. Techn. circular - New series n° 3 - MRSIRI/ORSTOM. (Réf. 3).

Faure G., Montaggioni L. (1976) - Les récifs coralliens au vent de l'Ile Maurice : géomorphologie et bionomie de la pente externe. Marine geology, 21. (Réf. 4).

Gill C.W. (1987) - A preliminary diving survey of the coral reefs around Mauritius (unpublished). (Réf. 5).

Griffits S.A., Williams E. (1985) - Coral and coral reefs in the Caribbean - A manual for students - C.C.A./UNEP. (Réf. 6).

Montaggioni L. (1972) - Essai de chronologie relative des stationnements marins quaternaires à l'Ile Maurice - C.R.A.S. t. 274. série D. (Réf. 7).

Montaggioni L. (1974) - Coral reefs and quaternary shorelines in the Mascarene archipelago (Indian Ocean). Proc. 2nd Int. coral reef symposium. (Réf. 8).

Montaggioni L. (1979) - Application du principe de Bruun à la détermination des variations du niveau marin au cours de l'Holocène : cas des îles Maurice et de la Réunion. Marine geology, 31. (Réf. 9).

Munbodh M., Ramyead T.S., Kallee P. (1987) - Les récifs coralliens et autres ressources des lagons mauriciens. Draft report. (Réf. 10).

Perroud B. (1981) - Etude volcano-structurale des îles Maurice et Rodrigues - Origine du volcanisme. Thèse, Univ. de Grenoble. (Réf. 11).

Pichon M.M. (1967) - Caractères généraux des peuplements des récifs et lagons de l'Ile Maurice. Cahiers ORSTOM, série océanographie, vol. 5, n° 4. (Réf. 12).

Quélennec R.E. (1981) - Rapport de synthèse générale sur la gestion régionale des sédiments. Séminaire national de Propriano. Rapport B.R.G.M. 81 SGN 653 EAU, bull. du B.R.G.M., section 3, n° 1, 1982. (Réf. 13).

Ramyead T.S. (1982, 1983) - The lime industry in Mauritius. Internal report MLTE/MMLE. (Réf. 14).

Simpson E.S.W. (1950) - The geology and mineral ressources of Mauritius. Colonial geological surveys bull., vol. 1, n° 3. (Réf. 15).

S.P.C. (1981) - Coral reef monitoring handbook. South Pacific Commission - Nouméa, Nouvelle-Calédonie. (Réf. 16).

T.C.E. (1982) - Taiwan cement engineering corporation : techical report for the establishment of a cement plant to Mauritius cement corporation. (Réf. 17).

UNIDO (1972) - Final report on assistance of cement industry in Mauritius - UNIDO/MAR/70.067/SIS - 031 - C. (Réf. 18).

Williams C.E.F. (1956) - Report on the Mauritius cement project. Mauritius legislative council. Sess. paper n° 7. (Réf. 19).

Wright P.C. (1967) - Reports on the raw materials available for cement and brick manufacture in Mauritius, together with the results of mineral reconnaissance and radiometric surveys. Inst. of geol. sci.. Mineral ressources division, report n° 76. (Réf. 20).

OUVRAGES GENERAUX

Ahmad Y.J., Sammy G.K. (1985) - Guidelines to environmental impact assessment. UNEP/Hodder and Stoughton.

Cempe (1982) - La planification et la gestion des eaux. Rapports généraux présentés à la 4ème conférence internationale de la Comm. europ. Méditer. de planification des eaux; bull. du BRGM, sect. 3, n° 3/4, 1982.

Dion B., Quélennec R.E. (1983) - La gestion régionale des sédiments. Interaction "eaux-sédiments" - Guide bibliographique. Rapport BRGM 83 SGN 017 EAU.

MAB-COMAR (1986) - Proc. of MAB-COMAR regional workshop on coral reef ecosystems : their management practices and research training needs, Jakarta.

PNUE (1982) - Marine and coastal area development in the East African region. UNEP Regional Seas Reports and Studies, n° 6.

PNUE (1984) - Conservation marine et côtière dans la région de l'Afrique de l'Est : rapports nationaux. Rapports et études des mers régionales, n° 50.

Quélennec R.E. (1984) - Eléments de dynamique sédimentaire littorale. Projet WACAF/3 - UNESCO/ONU-DIESA/PNUE - 1. Géomorphologie et hydrodynamique sédimentaire (rapport BRGM 84 SGN 272 EAU - 2. Guide pour un programme de mesures (rapport BRGM 84 SGN 273 EAU).

Robin B. (1980) - Les coraux : Nouvelle-Calédonie, Tahiti, Réunion, Antiles. Les éditions du Pacifique.

UNESCO (1983) - Coral reefs, seagrass beds and mangroves : their interaction in the coastal zones of the Caribbean. Unesco reports in Marine science. n° 23.

World Bank (1985) - Mauritius - Adjustment and growth. Country economic memorandum.

Planche 1

photo 1 - Plage nord de Flic-en-Flac avec talus d'érosion

photo 2 - Plage publique (sables et galets) de Tamarin, avec marques d'érosion dans la partie sud.

Planche 2

Photo 3 - Estrans limoneux, caillouteux et étroits entre Grande Case Royale et le Morne Brabant.

Photo - 4 - Plage privée du Beach comber hôtel, protégée avec épis courts, au Morne Brabant.

Planche 3

Photo 5 - Chenal artificiel reliant la lagune du Morne Brabant au lagon

Photo 6 - Plages de St Félix - pointe aux Roches

Planche 4

Photo 7 - Plage et falaise de "Gris-Gris" à Souillac

Photo 8 - Nombreuses structures individuelles et anarchiques de défense côtière sur le littoral "privatisé" et déstabilisé de pointe Desny

Planche 5

Photo 9 - Estrans étroits, limoneux et caillouteux à Grand Sable

Photo 10 - Escarpements rocheux (dalles basaltiques) et dune d'arrière-plage dans la région de Poste Lafayette

Planche 6

Photo 11 - Estrans rocheux avec blocs à Poudre d'Or

Photo 12 - Anse de Bain-Boeuf avec beach-rock sur l'estran

Planche 7

Photo 13 - Amoncellement de blocs basaltiques sur le littoral entre Batterie aux Grenadiers et Trou aux Roches

Photo 14 - Falaises de la pointe aux Caves

Planche 8

Photo 15 - Pointe Corail de la Prairie - ancien four à chaux et beach-rock

Photo 16 - Bancs d'éolianites reposant sur coulée basaltique et altérites à Salle d'Armes (Vieux Grand Port)

Planche 9

Photo 17 - Ancienne carrière de sable (abandonnée) dans le cordon dunaire à St Félix

Photo 18 - Cultures maraîchères sur la face arrière du cordon dunaire à Palmar et petite carrière de sable utilisée pour épandage d'amendements calcaires

Planche 10

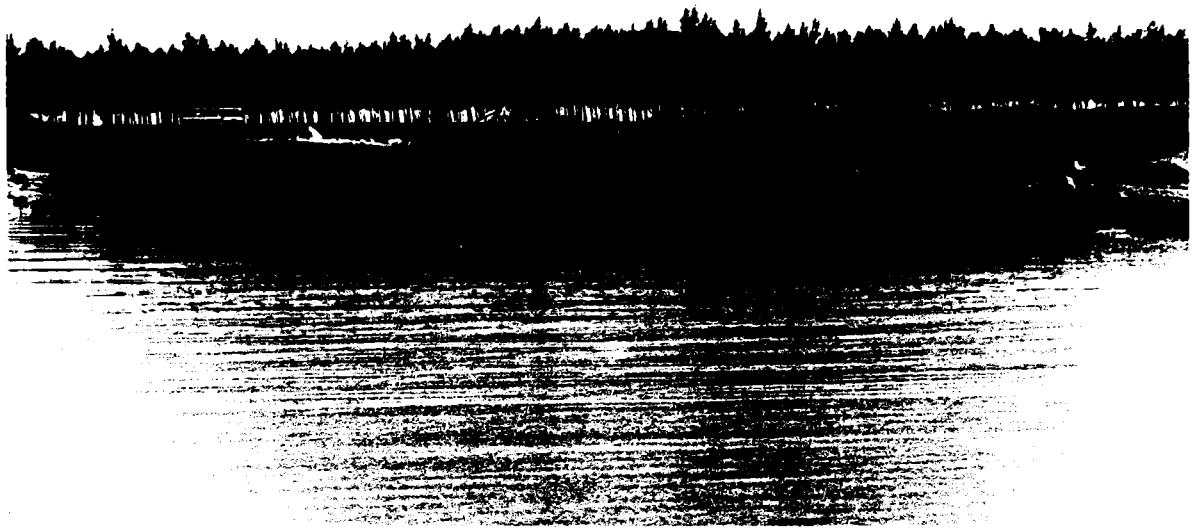


Photo 19 - Carrière terrestre d'extraction de sables et débris coralliens de l'U.B.P. à Wolmar

Photo 20 - Carrière terrestre d'exploitation de sables coralliens de l'U.B.P. à St Félix

Planche 11

Photo 21 - Site de déchargement du sable extrait du lagon à Grande Rivière du Sud-Est

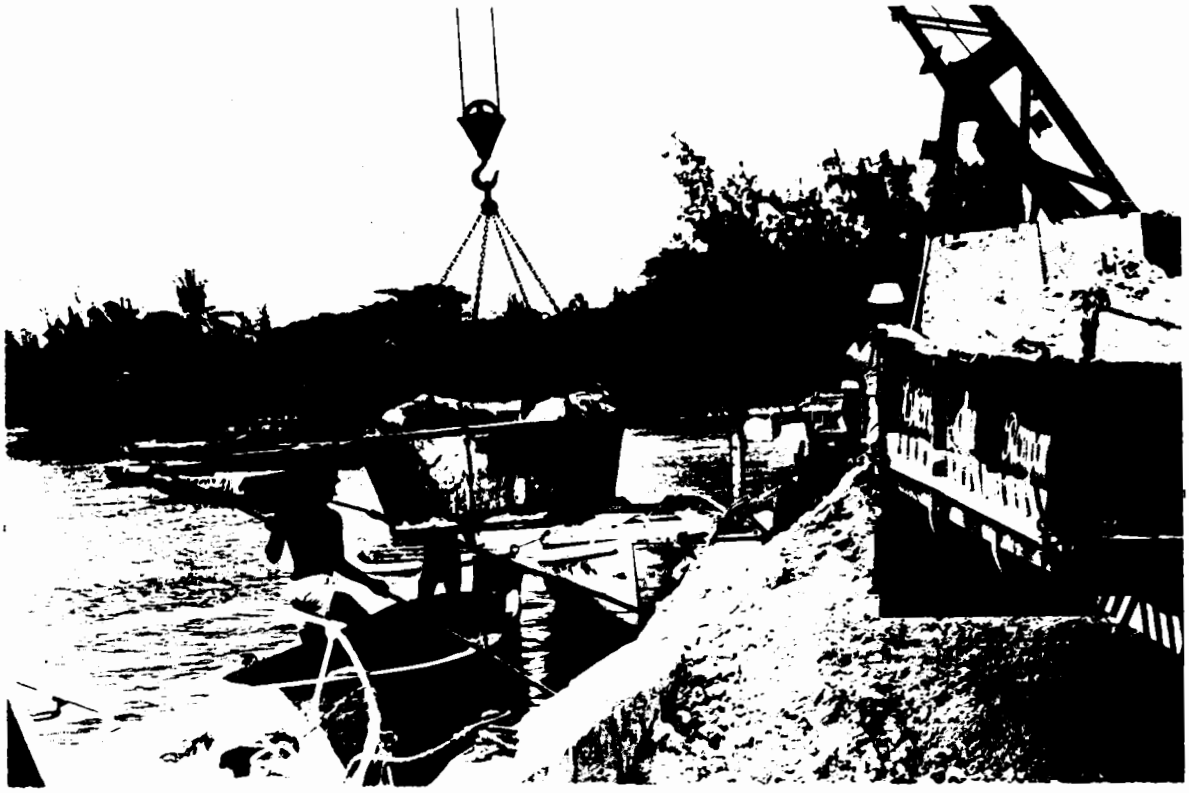


Photo 22 - Déchargement des pirogues à conteneurs à Bras de Mer/ Roches Noires

Planche 12

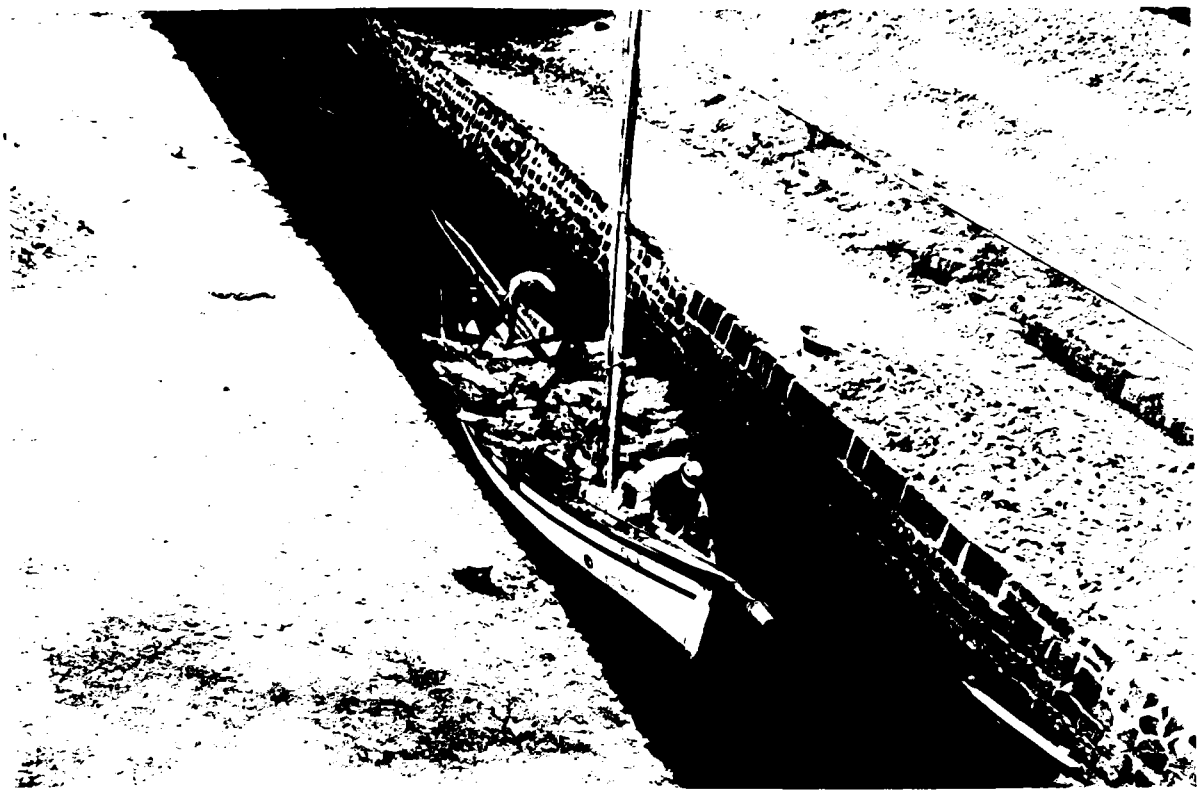


Photo 23 - Déchargement du corail vivant (platin) extrait du lagon de Mahébourg

Photo 24 - Stockage du corail fossile (à gauche) et vivant (à droite) à l'usine de fabrication de chaux de Mahébourg

Planche 13

Photo 25 - Enlèvement par l'U.B.P. des meules de basalte dans un champ de cannes à sucre près de la route d'Albion

Photo 26 - Installation (U.B.P.) de concassage des blocs basaltiques

EXTRAITS D'UN DOCUMENT INTITULE

"COUT DES REMISES EN ETAT DES CARRIERES

A DES FINS AGRICOLES"

Ministère du redéploiement industriel
et du commerce extérieur

Comité de gestion
de la taxe parafiscale sur les granulats
(France)

INTRODUCTION

En 1978, le Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats a décidé de lancer un programme de démonstration de remise en état à des fins agricoles.

Ces opérations, réalisées avec le financement conjoint de la Taxe Parafiscale sur les Granulats, du Ministère de l'Agriculture, des Chambres d'Agriculture, des carriers ont pour but de montrer aux agriculteurs et aux exploitants de carrières quelles sont les possibilités offertes par ce type de remise en état.

Ce programme de démonstration a fait suite à une phase expérimentale qui s'est déroulée de 1975 à 1978 sous la direction technique du B.D.P.A.* et a permis de déterminer les conditions techniques à respecter pour réaliser une remise en état agricole dans de bonnes conditions.

A l'issue de quatre années de démonstration, il est apparu nécessaire au Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats de procéder à l'analyse des coûts engendrés par la remise en état à des fins agricoles.

Dans ce but, un groupe de travail sur le coût des remises en état de carrières à des fins agricoles a été mis en place au cours de la séance du 24 février 1982 du Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats (cf. lettre de mission en annexe 5).

Les données chiffrées provenant des dossiers d'opérations de démonstration ont constitué une base de travail. La collecte de renseignements chiffrés auprès de plusieurs entreprises ayant effectué des travaux de remise en état agricole a permis de corroborer ces chiffres.

Le présent rapport n'a pas pour ambition de fournir une grille de calcul adaptable à toutes les situations rencontrées sur le terrain mais plutôt de situer le niveau du coût des travaux dans un certain nombre de cas types.

1. Modalités de la remise en état des carrières à des fins agricoles.

1.1. Conditions préliminaires.

Avant l'examen des conditions techniques de la remise en état agricole, il convient de s'assurer de la résolution des problèmes suivants :

1.1.1. Le risque de submersion.

Un des objectifs de la remise en état agricole est de garantir la mise hors d'eau de la couche de sol** réinstallée sur toute son épaisseur (au moins sur les 50 cm supérieurs). Il faut donc s'assurer de l'amplitude de la remontée des eaux pour la nappe phréatique ou des risques de débordement à proximité d'un cours d'eau. L'analyse des observations hydrogéologiques ou hydrologiques doit permettre de fixer une cote de référence d'altitude pour le terrain à remettre en état. Pour cette cote, il est couramment admis de retenir une cote supérieure

1.1.2. L'assainissement des terres.

Un examen des données relatives au gisement (nature et relief du fond, proportion de stériles...) et au milieu physique environnant (topographie, pluviométrie, perméabilité...) est nécessaire pour vérifier la faisabilité d'une remise en état agricole et concevoir un plan général d'assainissement de la zone à remettre en état.

1.1.3. La qualité du sol.

Un examen préliminaire des sols en place permet de caractériser les paramètres pédologiques importants pour la remise en état (texture, structure, sensibilité au compactage...). Le recueil de ces données sert de base à l'établissement des recommandations et conseils techniques pour la mise en œuvre de la remise en état agricole.

1.2. Conditions techniques de remise en état à des fins agricoles.

Les tâches d'une remise en état agricole de carrière «à l'avancement» débutent dès lors que l'extraction a dégagé une excavation initiale minimum permettant le fonctionnement de l'exploitation (évolution des engins, installations éventuelles).

1.2.1. La préparation du soubassement.

Une distinction sera à établir selon que l'on a affaire à un fond de fouille hors d'eau (gisement à sec) ou non. Dans ce dernier cas, le soubassement résulte du remblai rapporté pour combler la partie d'excavation en eau. Ce type de soubassement nécessite parfois une stabilisation du remblai sur une durée d'un ou deux ans.

Une pente générale devra être établie à la surface du soubassement (entre 0,5 et 1 % le plus souvent) grâce à un nivelage du terrain. Un défoncement de la surface sera généralement préconisé si le soubassement est peu perméable (par passage du ripper), ceci afin d'améliorer l'assainissement. Le rippage sera effectué de préférence juste avant le dépôt des terres de recouvrement.

1.2.2. La découverte** du sol.

Le respect avec lequel on manipule le sol avant et après exploitation conditionne la qualité et le délai de la reprise agricole. Au-dessus d'une certaine épaisseur de sol (> 50 cm), un décapage sélectif s'avère le plus souvent nécessaire et favorable à la remise en état agricole. Lors du décapage du sol, un certain nombre de précautions doivent être respectées :

— ne pas effectuer la découverte sur sol détrempé ou par temps pluvieux (incidences négatives sur la stabilité structurale...) ;

— ne pas utiliser les surfaces à découvrir comme plan de roulement pour les engins à pneus (tassements préjudiciables...) ;

— ne pas effectuer de poussage du sol sur des distances supérieures à 20 m (laminage...).

Les engins habituellement utilisés pour les opérations de découverte sont : le bouteur, le chargeur ou la pelle hydraulique.

en état coordonnée de la carrière doit viser à minimiser ce poste dont l'incidence est généralement importante en matière de coûts. Le transport s'effectue le plus souvent à l'aide de camions tombereaux. Ces engins exercent des pressions au sol importantes et leur circulation sur le soubassement doit être établie avec soin.

1.2.3. Le stockage éventuel.

Celui-ci est déconseillé d'une manière générale (lessivage, envahissement de la végétation, manipulations supplémentaires). De plus, la bonne gestion de l'exploitation de la carrière (abaissement du prix du transfert, gain d'espace, maintien des qualités du sol...) conduit à préconiser une rotation des terres avec mise en place immédiate des terres de découverte sur le secteur déjà exploité

Si le stockage ne peut être évité, on veillera à ne pas constituer un dépôt sur une hauteur trop importante, à le profiler en arrondi et à l'ensemencer si possible avec un semis de graminées ou de légumineuses (protection contre l'érosion ou la végétation envahissante).

1.2.5. Le recouvrement.

Cette opération de recouvrement du sol par les terres consiste en l'inverse de l'opération de découverte. C'est ainsi que les horizons inférieurs seront disposés en sous-couche et recouverts ensuite avec l'horizon humifère.

L'épaisseur totale du sol à reconstituer varie le plus souvent de 50 cm à 1 mètre. Lors de ces opérations de recouvrement, il faudra veiller tout particulièrement à éviter tout compactage en profondeur.

Pour cela, les camions et tombereaux se tiennent hors de la surface en cours de régalage. Les engins de régalage les mieux adaptés sont la pelle hydraulique pour la sous-couche et le chargeur à chenilles ou le bouteur pour la couche humifère (ceux-ci peuvent travailler alors depuis la surface définitive).

1.3. Organisation du transfert des sols.

Un certain nombre de formules sont possibles pour la reconstitution d'un sol agricole qui prennent en compte les modalités et précautions définies précédemment pour la mise en œuvre. Schématiquement, on peut représenter la remise en état «à l'avancement» (reconstitution opérée en liaison avec l'avancement de l'extraction) selon trois méthodes-types qui autorisent entre elles diverses combinaisons. Celles-ci sont représentées en annexe 1.

Signalons le cas particulier et la difficulté de la programmation lorsque le soubassement doit être rehaussé par un remblayage dont la durée est difficilement maîtrisable (gisement en eau).

1.4. Dispositions connexes.

Un certain nombre de travaux connexes accompagnent la remise en état agricole. Nous les citerons ici pour mémoire : aménagement des talus, ouvrages d'évacua-

2. Définition du coût des remises en état à des fins agricoles.

2.1. Méthodologie.

2.1.1. Les postes de dépenses.

La liste des tâches théoriquement spécifiques de la mise en œuvre d'une opération de remise en état agricole ressort des modalités définies précédemment. Certaines de ces tâches ne seront exécutées qu'éventuellement, en fonction des caractéristiques du milieu physique. Cette liste peut s'établir ainsi (le détail des différents termes renvoie au glossaire en annexe 4).

Préparation du soubassement.

1) Remblayage.
2) Nivelage soigné du fond de fouille ou du remblai.
3) Scarification.
4) Pompage.

Transfert du sol.

Décapage (éventuellement sélectif) et transport soignés.
6) Aménagement d'un stock de terre de sol.
7) Recouvrement soigné (éventuellement en deux horizons).
8) Finition de la surface : affinement du nivelage (tassement) et scarification.

Aménagements éventuels.

9) Mise en place d'une sous-couche de sol.
10) Epierrage.
11) Drainage et/ou sous-solage sur remblai.
12) Création de fossés d'évacuation des eaux.
13) Façons supplémentaires pour la préparation du lit de semence.

Il n'est pas fait état de divers travaux de «rattrapage» dont la nécessité ne serait liée qu'à une exécution défectueuse de tâches préalables ; par exemple, un amendement organique ou une fumure minérale de fond rendus indispensables par un mélange des horizons du sol d'origine ; ou encore l'établissement d'une prairie temporaire dans le but de restructurer un sol transféré dans de mauvaises conditions.

De même, on n'a pas envisagé d'autres interventions ayant pour but d'améliorer la valeur agricole du fond par rapport à la qualité d'origine ; par exemple, un amendement calcaire ou la création d'un bassin d'irrigation. Il va de soi qu'un épierrage ou un drainage ne devraient pas être pris en compte s'ils étaient entrepris pour répondre à un tel objectif.

Ajoutons que l'étude du coût de remise en état agricole ne saurait se concevoir que fondée sur l'analyse financière de réalisations conduites de façon rationnelle et suivies de résultats agricoles satisfaisants (au regard des productions obtenues alentour) ou sur des projets donnant toute garantie quant à la valeur agricole des sols à reconstituer.

2.1.2. Le problème de la diversité des situations.

région à une autre, d'un gisement à un autre et même parfois d'un secteur de gisement à un autre.

Or la définition du coût de remise en état agricole devrait englober tous les cas, par exemple depuis celui du Midi méditerranéen où il suffit souvent de replacer 50 cm de sol en couche unique sur fond de fouille meuble, jusqu'à celui de la vallée de l'Yonne en amont de son confluent où s'imposent un remblayage préalable du plan d'eau et le charroi d'une découverte de plus de 2 m d'épaisseur.

Dans ces conditions, les réflexions du groupe de travail ont abouti à l'établissement de plusieurs chiffres de coût de remise en état agricole correspondant aux situations-types. En dernière analyse, il en a été tiré une «fourchette».

2.1.3. Les facteurs variants

La définition des situations-types a procédé d'une démarche en deux temps : d'abord la détermination des principaux facteurs dont les variations influent sur le coût global, puis la combinaison systématique de ceux-ci.

a) Les principaux facteurs variants, susceptibles d'entraîner un renchérissement, sont ainsi énumérés (ces facteurs peuvent être pris individuellement ou combinés entre eux, selon les circonstances) :

— le remblayage du site ; l'utilisation directe du fond de fouille hors d'eau utilisé en soubassement ;

— la fourniture des matériaux de remblai par les excédents de découverte locale ; l'utilisation de matériaux apportés de l'extérieur dans le cadre d'une décharge de déchets inertes ;

— un fond de fouille de nature rocheuse ; un fond de fouille plus aisé à niveler constitué de matériaux meubles ;

— l'irrégularité du relief résiduel du fond de fouille ; une surface déjà proche de la planéité ;

— la nécessité de décaper et de recouvrir en traitant séparément deux horizons ou deux ensembles d'horizons de sol ; un décapage et recouvrement «en vrac» ;

— la nécessité de charger les terres dans les bennes pour le transport ; un transfert en fond de fouille par simple déversement au pied du front de taille ;

— un volume important de matériaux à transférer sur le site à remettre en état en ce qui concerne tant ceux devant constituer le soubassement (hauteur du remblai et proportion remblayée de la surface du site) que ceux du recouvrement (épaisseur de la couche de sol reconstitué) ; un faible volume de terrassements ;

— dans la remise en état de comparaison du site aquatique : l'obligation de consacrer les matériaux excédentaires de découverte à la constitution d'une plate-forme exondée, non susceptible de faire obstacle à l'écoulement de la nappe phréatique ; la possibilité de placer ces matériaux en berge (ce facteur n'apporte une variation que dans le calcul du «supplément» agricole) ;

— la nécessité d'épierrer le sol de recouvrement (généralement après une courte

— la nécessité d'installer un réseau de drainage pour corriger l'hydromorphie du sol créée par la nature peu perméable du remblai, l'absence d'hydromorphie sur remblai sain.

b) La combinaison de tous ces facteurs variants ferait apparaître 112 cas différents. Pour procéder au choix des situations-types, cette combinaison est présentée sous forme synoptique dans les deux tableaux I et II. Dans un but de simplification de l'exposé, on n'a pas tenu compte du facteur «pierrosité» ni du facteur «drainage» qui se traduisent par des coûts fixes (et qu'il suffira d'ajouter éventuellement en fin d'analyse) ; de ce fait, le nombre des cas classés se ramène à 56. Les situations-types contrastées ont été choisies aux positions extrêmes de ces grilles : il s'agit des cas n^{os} 1, 16, 17, 20 du tableau I et n^{os} 21, 23, 37, 40, 41 et 56 du tableau II.

Les différents scénarii financiers ont été présentés en annexe ; ils détaillent la nomenclature des opérations comptabilisées dans le cadre du réaménagement et de la remise en état à des fins agricoles et dite «minimum». Des schémas joints (ainsi que l'annexe 1) permettent de se représenter le cadre des opérations.

2.1.4. Le supplément agricole par rapport à quoi ?

L'exploitant est tenu de remettre en état les lieux affectés par les travaux, compte tenu des caractéristiques du milieu environnant, conformément aux articles 83 et 85 du Code minier, aux documents d'urbanisme et à toute autre disposition édictée notamment dans le cadre de polices spéciales.

Le supplément est relatif aux opérations qui ne relèvent pas de la remise en état «minimum» des sols. Aux termes de l'article 83 du Code minier (cf. annexe 3), la remise en état, notamment à des fins agricoles, peut être prescrite. L'article 84 (chap. III) du décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979 indique les opérations à caractère réglementaire pour la remise en état des sols (régalage, nettoyage...) en indiquant également qu'elle peut comporter toute autre mesure utile.

Le «supplément» agricole sera défini comme le coût des aménagements impliquant des travaux complémentaires qui vont au-delà de la simple remise en état minimum des sols.

Dans le cas présent, le supplément de dépenses agricoles a été appréhendé par rapport au coût d'une remise en état dite «minimum» : cette dernière comporte, certes, des variantes mais se base toujours sur la nécessité d'une simple réinsertion dans l'environnement. Signalons ici que ce terme de comparaison a été choisi pour des raisons de commodité. En effet, peut-être eût-il fallu fournir un terme de comparaison «non agricole» pour chaque opération, en vue d'évaluer l'incidence financière supplémentaire de l'objectif de remise en culture du sol. Mais le problème se pose alors de faire choix d'un terme de référence valable en matière de réhabilitation du site. Un autre type de remise en état ? Mais dans quel domaine d'utilisation ? Le coût de la réalisation d'un étang de pêche diffère fort

Extraits du Code minier relatif à l'abandon des travaux d'exploitation considérés comme mines ou comme carrières.

Livre Ier Règlement général.

Chapitre II.

De l'exercice de la surveillance administrative et des mesures à prendre en cas d'accidents.

Article 83.

(Loi n° 77-620 du 16 juin 1977, art. 20.)

Lors de l'abandon des travaux au terme de validité d'un titre ou d'une autorisation de recherches ou d'exploitation, ou bien dans le cas d'une exploitation par tranches, à la de l'exploitation de chaque tranche, le titulaire du titre ou de l'autorisation doit exécuter les travaux ayant pour objet la protection des intérêts mentionnés à l'article 84, qui lui sont prescrits par le préfet sur proposition du service des mines aprés consultation du conseil municipal de la commune intéressée. La remise en état notamment à des fins agricoles, des sites et lieux affectés par les travaux et par les installations de toute nature réalisés en vue de l'exploitation et de la recherche, peut être prescrite ; elle est obligatoire dans le cas des carrières. Ces dispositions sont applicables aux travaux visés à l'article 80.

A défaut d'exécution, les opérations prescrites sont effectuées d'office et aux frais du titulaire ou du contrevenant par les soins de l'administration.

Les communes et les départements ont un droit de préemption en cas de vente des carrières laissées à l'abandon qui ont été exploitées sur leur territoire.

Article 84.

(Loi n° 77-620 du 16 juin 1977, art. 20.)

Si les travaux de recherches ou d'exploitation d'une mine sont de nature à compromettre la sécurité et la salubrité publiques, les caractéristiques essentielles du milieu environnant, terrestre ou maritime, la conservation de la mine ou d'une autre mine, la sûreté, la sécurité et l'hygiène des ouvriers mineurs, la conservation des voies de communication, la solidité des édifices publics ou privés, l'usage, le débit ou la qualité des eaux de toute nature, l'effet des mesures générales arrêtées par décret à l'intérieur d'une zone spéciale d'aménagement des eaux, il y est pourvu par le préfet, au besoin d'office et aux frais de l'explorateur ou de l'exploitant.

Extraits du décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979, relatif aux autorisations de mise en exploitation des carrières, à leur renouvellement, à leur retrait et aux renonciations à celles-ci.

Chapitre III.

De l'octroi des autorisations et des obligations de l'exploitant, articles 23 et 24.

Art. 23. — 1° L'arrêté préfectoral accordant l'autorisation d'exploiter une carrière précise les nom, prénoms, nationalité et domicile du bénéficiaire ou, s'il s'agit d'une société, les indications en tenant lieu, énumère les substances pour lesquelles l'autorisation est accordée, en détermine les limites territoriales et en fixe la durée, qui ne peut excéder trente ans.

L'arrêté mentionne les conditions particulières d'exploitation auxquelles est subordonnée l'autorisation d'ouverture de la carrière, les mesures retenues pour prévenir, supprimer, réduire et si possible compenser les inconvénients de l'exploitation sur le milieu environnant ainsi que les mesures retenues, selon les modalités énoncées à l'article 24, pour la remise en état des lieux soit au fur et à mesure des travaux, soit en fin d'exploitation.

2° L'autorisation est accordée sous réserve des droits des tiers et n'a d'effet que dans les limites des droits de propriété du demandeur et des contrats de fortage dont il est titulaire.

Art. 24. — 1° L'exploitant est tenu de remettre en état les lieux affectés par les travaux, compte tenu des caractéristiques essentielles du milieu environnant, conformément aux articles 83 à 85 du code minier, aux documents d'urbanisme et à toute autre disposition édictée notamment dans le cadre de polices spéciales.

La remise en l'état des lieux comporte la conservation des terres de découverte nécessaires à cette remise en état, le régalage du sol et le nettoyage de l'ensemble des terrains. Elle peut comporter toute autre mesure utile et notamment la rectification des fronts de taille, l'engazonnement, la remise en végétation des terrains exploités, la remise en état du sol à des fins agricoles ou forestiers, le maintien ou la création de rideaux de végétation et le remblayage des fouilles dans des conditions propres à protéger la qualité des eaux.

Dans le cas où l'exploitation de la carrière doit être conduite en milieu aquatique ou porterait sur les berges d'une étendue d'eau, des mesures tendant au maintien du régime hydraulique et des caractéres écologiques dudit milieu ainsi qu'à la protection de l'usage et de la qualité des eaux doivent être prescrites.

Les mesures prévues aux alinéas précédents sont déterminées, le demandeur entendu. En cas d'inexécution de ces mesures par l'exploitant, les dispositions de l'article 38 ci-dessous sont applicables.

2° La contribution de l'exploitant de carrière à la remise en état des voiries départementales et communales reste fixée par les règlements relatifs à la voirie des collectivités locales.

REMOVAL OF SAND

15 October 1975

ARRANGEMENT OF SECTIONS

1. Short title.
2. Interpretation.
3. —
4. Sand quarries and sand landing places.
5. Licences.
6. Lease of sand quarries.
7. Authority to remove sand.
8. Removal of sand.
9. Permit to remove sand.
10. Transport of sand.
11. Permitted hours for removal of sand.
12. Duty to give information.
13. Sale of sand.
14. Production of documents.
15. Arrest.
16. Offences and penalties.
17. Revocation and non-renewal of licences.
18. Regulations.

---

1. Short title.

This Act may be cited as the Removal of Sand Act.

2. Interpretation.

In this Act—

"authorised officer" means—

(a) in respect of the Island of Mauritius, an officer of the Ministry of Housing Lands and Town and Country Planning designated by the Minister; and

(b) in respect of Rodrigues, the Chief Officer of Police;

"document" means—

(a) a permit to remove sand from a sand quarry or sand landing place;

(b) a receipt for the purchase of sand from a licensed dealer; or

(c) a written acknowledgment from the authorised officer of a notice of intention to transport sand;

"licensed dealer" means a person licensed under section 5;

"Minister" means the Minister to whom responsibility for Crown land is assigned;

"officer" means the authorised officer or the Conservator of Forests, and any person authorised by the authorised officer or the Conservator of Forests, or a police officer;

"sand", in relation to Crown land, includes stones, coral, earth and turf;

"sand landing place" means any place designated as such under section 4(1);

"sand quarry" means any place designated as such under section 4(1);

"vehicle" includes boat.

3. —

4. Sand quarries and sand landing places.

(1) The Minister may by notice published in the *Gazette* and in 2 daily newspapers designate—

(a) an area as a sand quarry;

(b) sand landing places.

(2) The limits of every sand quarry shall be clearly indicated by posts placed by the authorised officer.

(3) No sand removed from the sea or from a river shall be landed except at a sand landing place.

5. Licences.

(1) No person shall carry on the business of dealer in sand unless he is the holder of a licence granted under subsection (2).

(2) The authorised officer may—

(a) on payment of the prescribed fee; and

(b) subject to such conditions as he thinks fit to impose,

grant a licence to deal in sand to an applicant for a period not exceeding one year.

6. Lease of sand quarries.

(1) Notwithstanding section 6 of the Crown Lands Act, the Minister may grant a lease of a sand quarry to a licensed dealer for such term and upon such conditions as he thinks fit and on giving such security as the Minister considers adequate for the observance of those conditions.

(2) Subject to subsection (3), where during the term of a lease granted under subsection (1), the lessee ceases to be a licensed dealer, the lease shall be revoked with effect from the date the lessee ceases to be a licensed dealer and the lessee shall be refunded the amount paid in respect of the unexpired part of the term of the lease.

(3) Where a licensed dealer dies, his spouse, heir or representative may, with the approval of the authorised officer, carry on his business for the unexpired portion of the licence, either personally or by an agent approved by the authorised officer.

7. Authority to remove sand.

(1) No person shall remove or transport sand, or cause sand to be removed or transported, unless he is in possession of a document authorising him to do so.

(2) Where a vehicle is used for the transport of sand the document shall remain in the possession of the person in charge of the vehicle while the sand is being transported.

(3) Every document shall be—

(a) in the prescribed form; and

(b) issued in respect of one day only.

8. Removal of sand.

No person shall remove or cause any sand to be removed other than from a sand quarry or sand landing place.

9. Permit to remove sand.

(1) Any person who wishes to remove sand other than from the sand quarry of a licensed dealer shall apply for a permit to the authorised officer.

(2) All applications under subsection (1) shall state the quantity of sand to be removed and the purpose for which it is required.

(3) No permit shall be granted under subsection (1) except on payment of the prescribed fee and subject to such conditions as the authorised officer thinks fit to impose.

(4) The permit shall be produced to an officer before any sand is removed and no sand shall be removed except in the presence of the officer.

(5) The officer shall endorse the permit after the sand has been removed and the endorsement shall be proof of the removal of the sand.

10. Transport of sand.

(1) Any person who wishes to transport sand to which neither section 9(1) nor 13 applies shall give written notice of his intention to the authorised officer setting out—

(a) the quantity of sand to be removed;
(b) the date of removal;
(c) the mode of transportation;
(d) the place from which it will be removed; and
(e) the place to which it will be taken.

(2) On receipt of a notice under subsection (1) the authorised officer shall forthwith acknowledge the receipt of the notice in the prescribed form.

11. Permitted hours for removal of sand.

No person shall remove or transport sand between sunset and sunrise.

12. Duty to give information.

(1) Where an officer has reason to suspect that a vehicle has been used for the unlawful removal of sand he may require the owner of that vehicle to give him information as to the name, address, description and whereabouts of the person driving the vehicle and any other person travelling in the vehicle at the time of the alleged offence, as well as the place from which the sand has been removed.

(2) An officer may require any person to give any information which it is in the power of that person to give in relation to the identification of the driver or passenger of a vehicle suspected of having been used for the unlawful removal of sand.

(3) Any person who refuses to give any information required from him under this section or gives any information which is false in a material particular shall commit an offence.

13. Sale of sand.

(1) No licensed dealer shall refuse to sell sand to a purchaser who offers to buy sand for cash at the prescribed rate.

(2) Any person who sells sand shall issue a receipt in the prescribed form to the purchaser.

14. Production of documents.

Every person who removes, transports or deals in sand shall, on request, produce to an officer the document authorising him to remove, transport or deal in sand.

15. Arrest.

An officer may, without warrant—

(a) arrest—
  (i) the driver of a vehicle suspected of being used for the unlawful removal of sand;
  (ii) a person found driving a vehicle transporting sand who, when required to give his name and address, refuses to do so or gives a name and address which the officer has reason to believe is false;
(b) seize a vehicle suspected of being used for the unlawful removal of sand.

16. Offences and penalties.

(1) Any person who contravenes this Act shall commit an offence.

(2) Any person who commits an offence shall, on conviction, be liable to a fine not exceeding 1000 rupees and to imprisonment for a term not exceeding one year.

(3) The court before which any person is convicted of an offence under this Act may, in addition to any penalty imposed, order any sand or any vehicle used in the unlawful transport of sand to be forfeited.

17. Revocation and non-renewal of licences.

(1) Where a licensed dealer is convicted of an offence under this Act, the authorised officer may revoke or refuse to renew his licence.

(2) Any person aggrieved by a decision of the authorised officer under subsection (1) may within 30 days of the notification of the decision to him appeal to the Minister by lodging a notice of appeal with the Principal Assistant Secretary, Ministry of Housing, Lands and Town and Country Planning setting out the grounds of appeal.

(3) The decision of the Minister on any appeal under subsection (2) shall be final.

18. Regulations.

LA HOUILLE BLANCHE / N° 2/3-1975

Effets des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines

PAR

P. Peaudecerf

Ingénieur au B.R.G.M.

Les énormes besoins en matériaux de construction et de remblai ont transformé bien des plaines alluviales de notre pays en une succession d'excavations. Dans la plupart des cas, ces formations alluviales constituent des aquifères de bonnes caractéristiques et les excavations atteignent le niveau de la nappe. Elles constituent alors autant de plans d'eau.

En règle générale, dans les années passées, on a tenté de maintenir ces extractions de graviers hors des zones où les eaux souterraines étaient exploitées. Les ressources en matériau s'amenuisant au cours des années, la pression des besoins fait que les exploitants des sablières et des gravières tentent de s'implanter bien plus près des captages d'eau. Ce voisinage, cette exploitation simultanée de l'eau et du gravier sont-ils compatibles ? Avant d'avancer une réponse, il convient de bien mesurer les effets positifs ou négatifs de la présence des gravières au sein des nappes. Elles peuvent influer sur le comportement hydrodynamique des eaux souterraines, sur les niveaux et les écoulements. Suivant leurs positions par rapport au système aquifère, elles tendent à augmenter l'alimentation ou le drainage des nappes. Par leurs éventuelles communications avec les cours d'eau, par le colmatage de leurs berges, elles peuvent constituer un cheminement privilégié ou, au contraire, un obstacle à l'écoulement des eaux souterraines.

Mais ce sont les effets des gravières sur la qualité des eaux qui viennent le plus naturellement à l'esprit. En contact avec l'atmosphère et sous l'influence du rayonnement solaire, les eaux des gravières se peuplent d'organismes animaux ou végétaux. Leurs caractères chimiques ou biologiques peuvent être notablement modifiés. Ces phénomènes ont fait l'objet d'études pleines d'intérêt.

D'autre part, véritable mise à nu de la nappe, les carrières constituent au sein des aquifères une zone très vulnérable à la pollution. Même dans les cas où le dépôt des matières polluantes, comme les déchets industriels ou ménagers, est officiellement interdit, il est en pratique très difficile de l'empêcher totalement. La présence de gravières en eau multiplie les risques de pollution des eaux souterraines.

Or, si l'on fait appel en priorité aux eaux souterraines pour l'alimentation des populations urbaines ou rurales, c'est principalement à cause de leurs qualités biologiques et chimiques.

Mais ces pollutions tant redoutées ne sont à craindre que si des transferts notables peuvent avoir lieu entre le plan d'eau libre et la nappe.

Ainsi, que ce soit pour évaluer les perturbations des niveaux et des écoulements de la nappe consécutives au creusement de gravières, ou encore pour prévoir la vulnérabilité des réserves en eau souterraine à une éventuelle pollution, il est nécessaire de bien connaître l'hydrodynamisme des systèmes gravière-nappe.

Dans les lignes qui suivent, nous nous proposons de passer rapidement en revue les facteurs les plus importants qu'il faudra prendre en compte pour cette étude. A cette occasion, nous évoquerons leurs effets principaux. Ensuite, nous étudierons les moyens dont dispose l'hydrogéologue pour évaluer ces paramètres et prévoir leurs effets. Nous illustrerons notre propos par des références à des études récentes ou actuelles.

Les paramètres principaux du système nappe-gravière

Les effets du creusement d'une gravière sur les niveaux de la nappe, les perturbations apportées à son écoulement ou encore les débits d'échange entre gravière et nappe dépendent des facteurs géométriques ou physiques suivants :

IMPORTANCE DU COLMATAGE DES BORDS ET DU FOND

Ce premier paramètre évoqué constitue un facteur essentiel de l'influence d'une gravière sur une nappe. Habituellement, seuls le fond et les berges avals connaissent un colmatage durable. Ses effets sont évidents comme nous l'avons schématisé à la figure 1 :

une carrière non colmatée accroît les écoulements souterrains : la partie de l'aquifère à son amont est rabattue, à l'aval les niveaux sont relevés. Il se produit une convergence des filets fluides vers l'excavation. Les débits d'échange vers la nappe sont maximaux;

— au contraire, si les berges sont colmatées, la carrière constitue pour les écoulements souterrains un obstacle qui doit être contourné. Les niveaux de la nappe s'élèvent à l'amont, ils sont rabattus à l'aval. Il peut même y avoir un débordement du plan d'eau de la gravière. Les débits d'échange vers la nappe et les risques de pollution sont donc minimes.

Le colmatage est le résultat de phénomènes divers et mal connus. Il peut être provoqué par le dépôt des matériaux les plus fins lors de l'extraction des sables et graviers, par un processus physico-chimique ou même biologique. Dans l'état actuel des connaissances, et en attendant des études poussées de ces phénomènes, il est très difficile de prévoir son intensité et ses variations au cours des années à venir. En cas de besoin, on peut tenter d'accélérer ce colmatage par des procédés mécaniques.

PÉNÉTRATION DE L'EXCAVATION

On ne s'intéresse qu'aux gravières atteignant le niveau de la nappe. On peut considérer les deux cas de la figure 2. Si les berges et le fond ne sont pas colmatés, la profondeur de pénétration n'aura pratiquement pas d'effet car les écoulements dans les formations restées en place en dessous seront négligeables par rapport à ceux passant dans la carrière. Au contraire, pour les carrières colmatées, les écoulements ne seront possibles que dans la tranche des matériaux restés en place et la transmissivité effective sera diminuée en proportion de la pénétration de l'excavation.

EMPLACEMENT DES GRAVIÈRES PAR RAPPORT AU SYSTÈME AQUIFÈRE

La position de ce plan d'eau libre importe bien évidemment. En amont de la zone aquifère considérée, il améliore son alimentation ou la diminue suivant le degré du colmatage des bords. A cet emplacement les risques de pollution sont les plus importants. Au contraire, à l'aval de la nappe, c'est son drainage qui est augmenté ou diminué suivant ce colmatage.

RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Les relations des plans d'eau des excavations avec les cours d'eau permettent de maintenir, au milieu du système aquifère, un niveau imposé avec tout ce que cela entraîne comme conséquences sur les écoulements et, notamment, l'augmentation du drainage ou de l'alimentation de la nappe.

La position même de ces relations peut avoir un effet important. Considérons, par exemple, le cas schématisé à la figure 3, d'une sablière allongée parallèlement à un cours d'eau de pente non négligeable. On suppose qu'il existe une nappe dont l'écoulement général est approximativement parallèle à celui du cours d'eau. Suivant que le canal de liaison sera situé à l'amont ou à l'aval, les débits d'échange se feront de la gravière vers la nappe ou le contraire et, en conséquence, on observera une alimentation ou un drainage accru de la nappe.

FORMES ET DIMENSIONS DES EXCAVATIONS; ORIENTATION PAR RAPPORT A L'ÉCOULEMENT DE LA NAPPE

Une carrière en eau impose, au milieu de la nappe, un niveau pratiquement horizontal sur toute sa surface. On conçoit que son influence dépende de sa forme et de ses dimensions.

Une excavation de forme allongée (cf. fig. 4), dont la plus grande dimension est perpendiculaire à l'écoulement naturel des eaux souterraines, aura peu d'effet sur les écoulements. Au contraire, si elle est creusée parallèlement à ces écoulements, les rabattements provoqués à l'amont et les élévations du niveau à l'aval (ou les risques de débordements du plan d'eau en cas de berges colmatées) seront très importants.

Dans cette dernière configuration, et comme l'expliquent les figures 5 et 6, le morcellement de l'exploitation peut permettre d'éviter ces débordements même si le colmatage des berges et la topographie ont tendance à les provoquer.

CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME AQUIFÈRE

Le comportement de la nappe sous l'influence d'éventuelles gravières dépendra bien évidemment de ses caractéristiques propres.

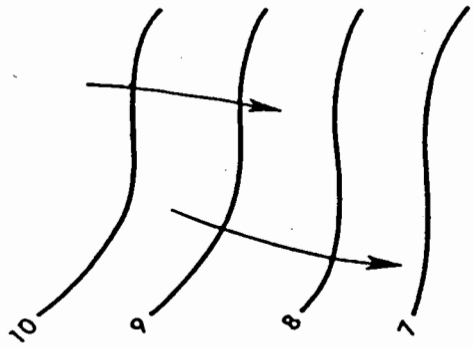
Il nous suffira d'énumérer quelques-uns de ces paramètres omniprésents dans les études hydrogéologiques : la piézométrie, l'extension de la nappe, ses limites et leurs natures, les paramètres hydrodynamiques dont l'hétérogénéité peut jouer un rôle important. Il faut souligner que la propagation d'une pollution à partir d'une gravière peut être influencée par les éventuelles différences des perméabilités de chaque horizon. Ce phénomène est d'ailleurs commun à tous les transferts de masse dans les milieux poreux stratifiés.

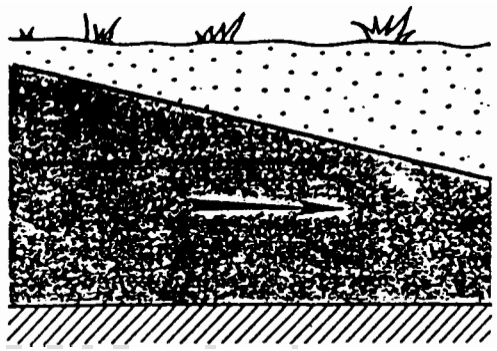
Nous pouvons aussi noter qu'il faudra évidemment considérer la profondeur de l'eau et la topographie pour évaluer les risques de débordement.

Enfin, l'implantation d'un plan d'eau est la cause de pertes par évaporation, mais celles par l'évapotranspiration,

Plan **Coupe**

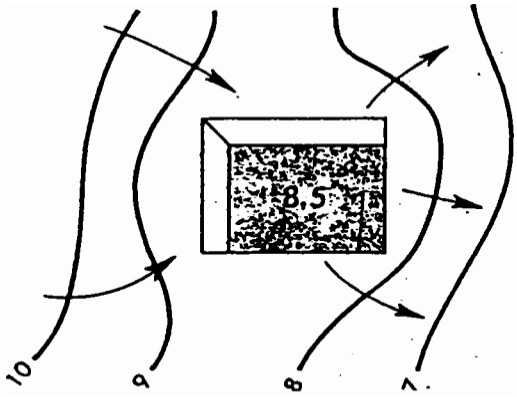
Etat naturel

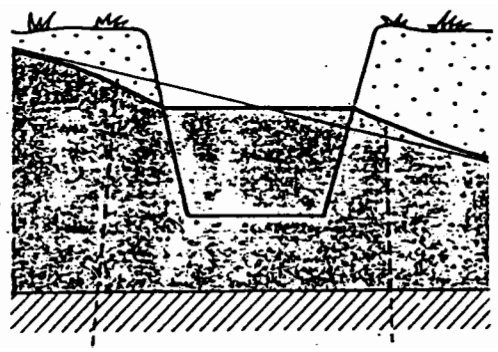




Piézométrie naturelle

Carrière non colmatée



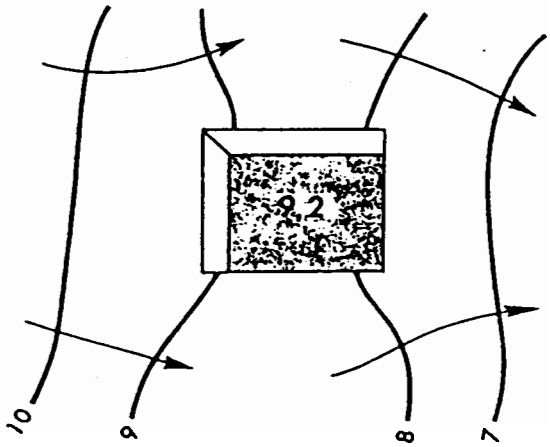


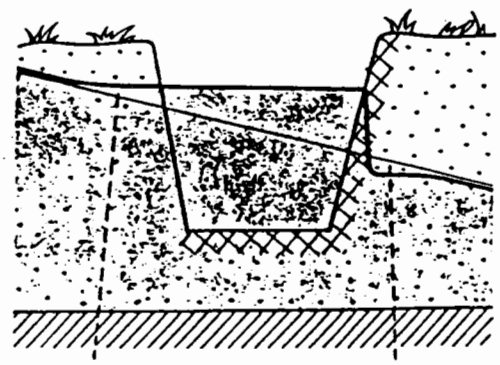
Convergence des écoulements

Amont rabattement

Aval élévation du niveau

Carrière colmatée





Obstacle

Amont élévation du niveau

Aval rabattement

1/ Effets du colmatage de la gravière.

due aux végétaux qui croissaient sur le sol disparu, peuvent être plus importantes. D'autre part, le décapage de couches superficielles imperméables peut favoriser l'alimentation par les pluies, et la création de bassin peut accroître l'infiltration d'eaux de ruissellement. Ces phénomènes dépendent de la surface des exploitations. Ils sont habituellement de faible importance.

Moyens disponibles pour évaluer ces paramètres et prévoir leurs effets

Pour apprécier les effets de ces facteurs sur le comportement de la nappe, nous avons à notre disposition des méthodes de mesure et d'interprétation. Sur certains points cependant, il apparaît nécessaire d'approfondir la méthodologie.

MÉTHODES DE MESURE

Il n'est pas utile d'évoquer les paramètres géométriques. Quant aux paramètres hydrogéologiques, leurs relevés et mesures sont tellement utilisés, qu'on peut ne pas les rappeler ici. Il faut cependant faire une mention spéciale pour la mesure des perméabilités : répartition verticale des perméabilités des différents horizons et surtout évaluation du colmatage.

— Le relevé systématique des perméabilités sur une même verticale est habituel en géotechnique. Les méthodes de mesure dans les forages, basées sur l'injection ou le pompage d'eau, sont relativement coûteuses. Ces coûts peuvent ne pas être acceptables dans les études des influences gravière-nappe. Dans les forages adéquats, un relevé des vitesses au micromoulinet pourra donner des résultats suffisants pour évaluer l'hétérogénéité verticale des perméabilités. Il s'agit sans doute de la méthode la plus appropriée.

— On a vu plus haut combien le colmatage des berges et du fond de la gravière était le paramètre essentiel. A défaut de bien connaître le processus de sa formation, il apparaît au moins nécessaire de savoir le mesurer, sur la gravière elle-même ou sur des gravières plus anciennes, pour connaître son évolution dans des conditions comparables. Or, nous avons comme moyens pratiques de mesure :

— le pompage d'essai dans un forage proche du bord du plan d'eau que l'on veut tester;

— l'interprétation de la propagation dans la nappe d'une onde de pression à partir d'une variation du plan d'eau;

— le prélèvement d'échantillons et leur analyse en laboratoire.

Disons tout de suite que cette dernière technique est très délicate, car elle consiste à prélever des échantillons non consolidés en milieu aqueux. Elle présente l'inconvénient d'être très localisée. La seconde méthode est rarement utilisable car les fluctuations de la nappe ne dépendent pas directement de celles du plan d'eau libre voisin, mais le plus souvent elles ont les unes et les autres la même cause, les précipitations. Seuls les cas où la carrière est en relation avec un cours d'eau de quelque importance peuvent être traités ainsi. On obtient la diffusivité moyenne de la partie du milieu poreux située entre le forage de mesure et le plan d'eau libre.

Enfin, les pompages d'essai constituent la base de la méthode la plus générale et la plus sûre. Leur interprétation n'est pas toujours aisée. Un colmatage très poussé se détectera bien évidemment par l'apparition des effets d'une barrière étanche. Dans le cas contraire, on observera une stabilisation des niveaux. Le temps d'apparition de cette stabilisation nous permettra de calculer la « distance fictive » du plan d'eau si l'on suppose le milieu aquifère homogène. S'il n'y a pas de colmatage, cette distance est exactement égale à la distance séparant le plan d'eau du forage. L'intensité du colmatage sera donc matérialisée par cette « distance fictive ». Au cours des interprétations ultérieures sa valeur sera directement utilisable dans les calculs ou les modèles.

Il n'en demeure pas moins qu'un effort important doit être effectué pour connaître le processus de formation du colmatage et pour mettre au point des méthodes pratiques pour le mesurer.

MÉTHODES D'INTERPRÉTATION

Il s'agit d'évaluer le comportement du système gravière-nappe. Suivant la complexité du problème un simple calcul suffira ou il faudra faire appel à un modèle de simulation. La gamme importante des modèles en hydrogéologie permet de simuler toutes les conditions possibles.

On peut souligner les grands services que peuvent rendre dans ce but les modèles analogiques par la technique du papier conducteur. Leur simplicité d'emploi, leur coût très faible, la faculté de reproduire aisément les formes géométriques des gravières et des limites, en font des outils très appropriés à ce problème. Localement l'homogénéité des transmissivités peut être souvent acceptée. Mais la simulation des colmatages manque évidemment de finesse. Ces paramètres restent pour la plupart des cas mal connus et la simulation des conditions extrêmes est parfois suffisante.

Si on recherche plus de précision, pour un aménagement plus important par exemple, on peut mettre en œuvre des techniques plus sophistiquées. On peut citer les modèles mathématiques à mailles régulières ou de dimensions variées pouvant tenir compte des effets éventuels de nappe libre. Ils peuvent simuler des débordements de la nappe et du plan d'eau. Les données géométriques et hydrogéologiques à rassembler sont évidemment plus nombreuses.

Les simulations peuvent être limitées au régime permanent. Elles peuvent être suivies de la simulation de la propagation d'un front de pollution à partir d'un point quelconque de la nappe.

Ces modèles permettent de répondre complètement aux questions telles que les suivantes :

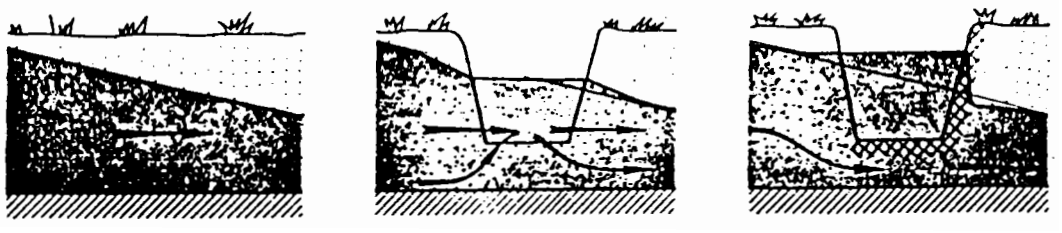
— Quel sera le rabattement de la nappe à l'amont du plan d'eau ? L'élévation du niveau à l'aval ?

— Quelle sera l'influence de la gravière en eau sur tel captage, sur son niveau ou son débit ?

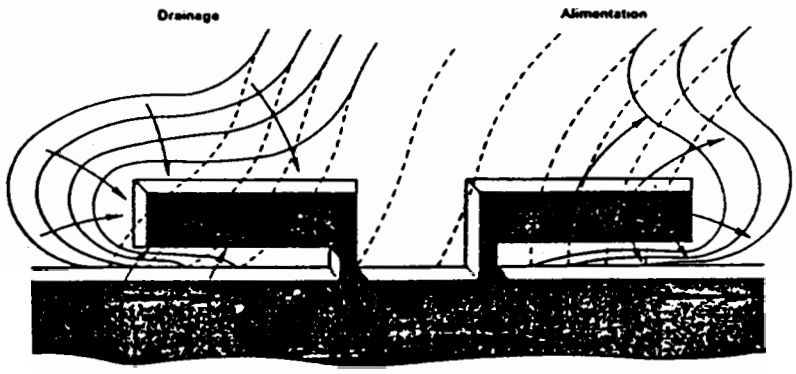
— Y a-t-il des risques de débordement du plan d'eau ?

— Quelle sera la proportion du débit de captage provenant du plan d'eau ? Quel est le temps de cheminement de l'eau entre la gravière et le captage ?

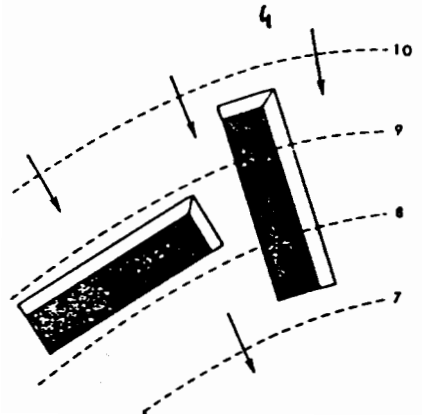
— Etc.



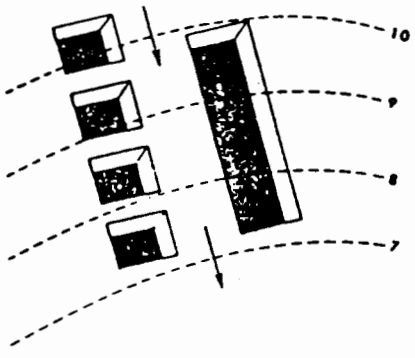
2/ Effet de la pénétration de l'excavation.



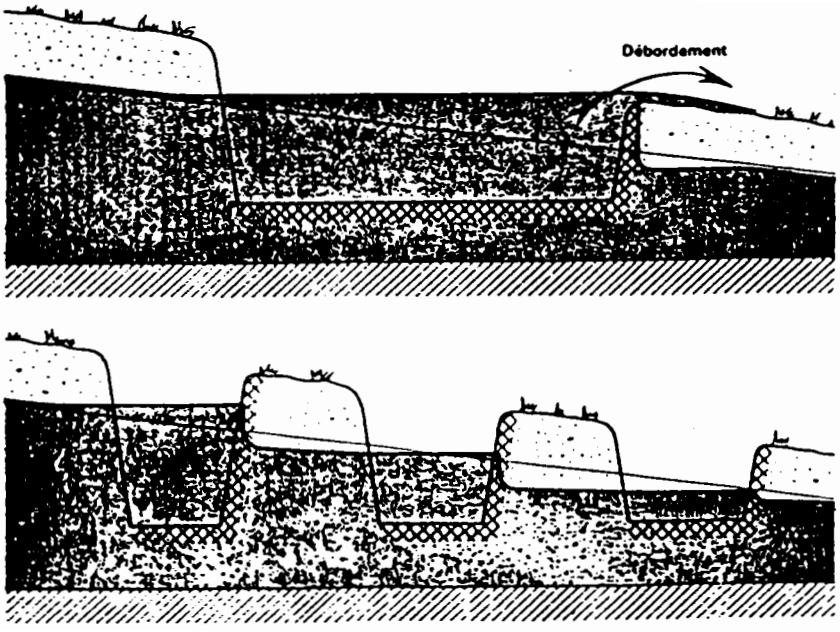
3/ Effets des relations avec les cours d'eau.



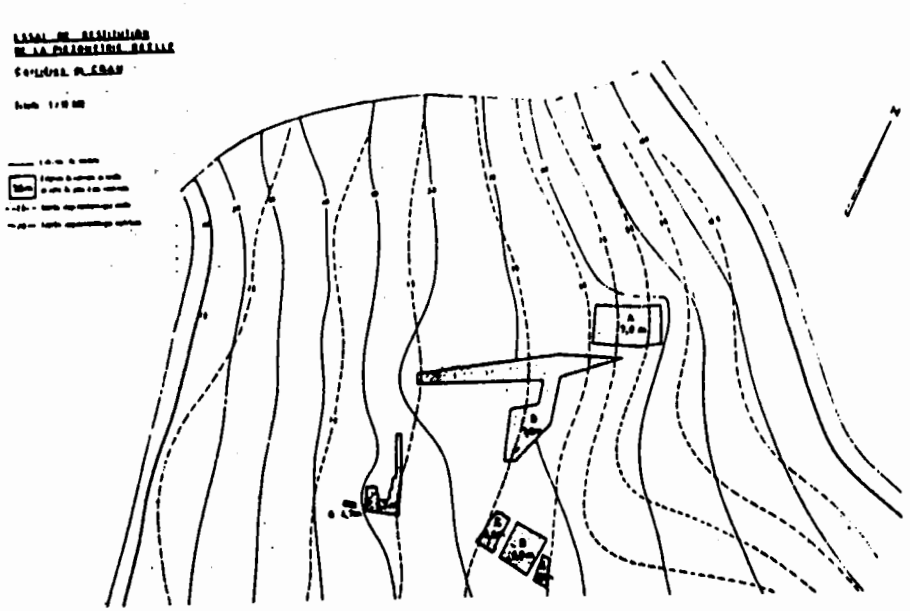
4/ Exemple d'orientation des gravières.

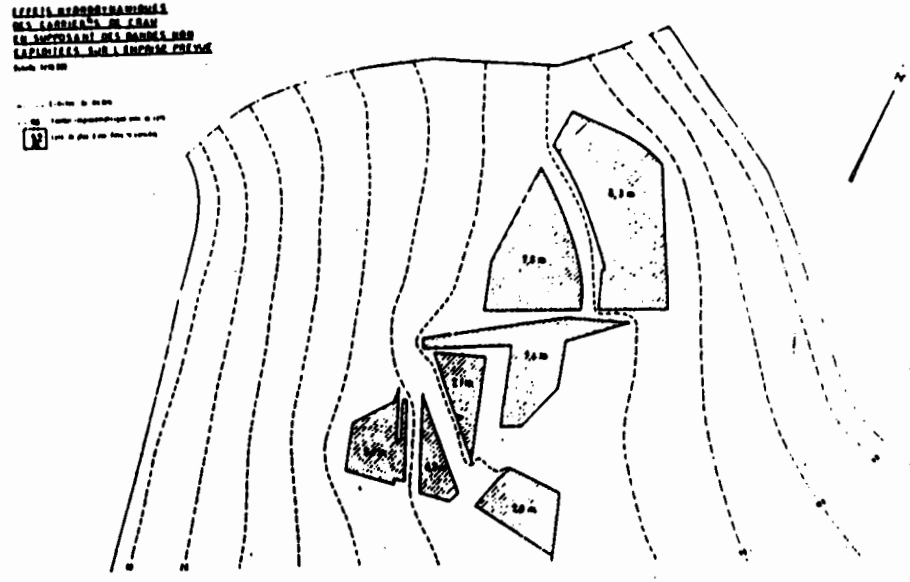


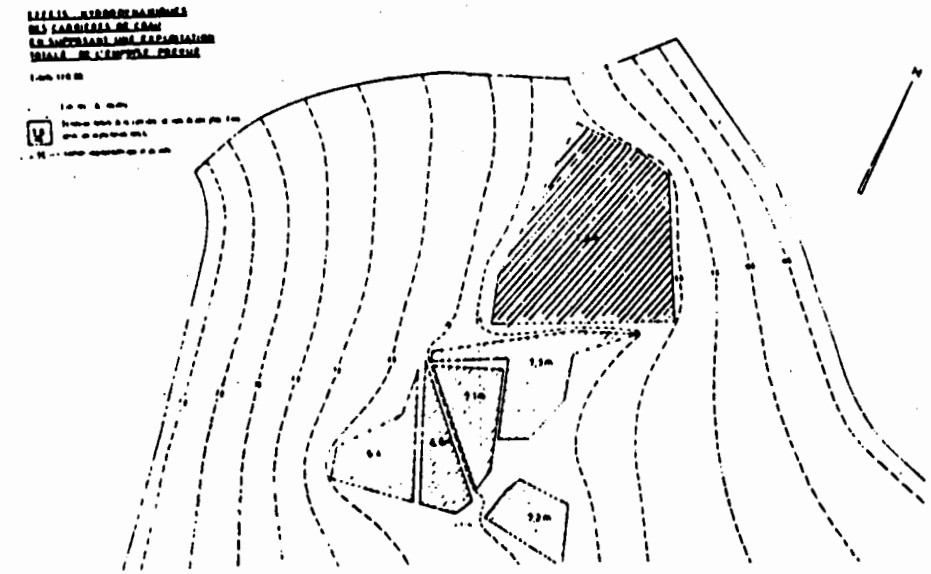
5/ Exemple de morcellement des excavations.

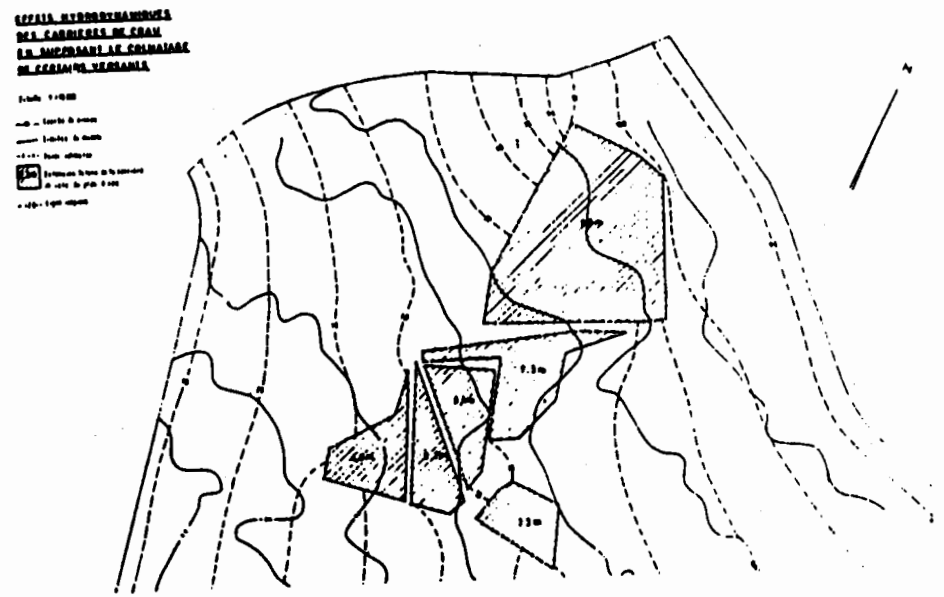


6/ Effets du morcellement des gravières colmatées.









Exemples d'études

Pour illustrer ces propos, considérons les études très différentes suivantes :

GRAVIÈRES EN CRAU (*)

Prenons, par exemple, le cas qui s'est posé lorsqu'il s'est agi d'étendre des gravières en Crau. Les alluvions de la Crau possèdent à la fois une nappe remarquable par ses dimensions et ses qualités et des réserves en graviers non moins remarquables. Ces ressources en eau ou en graviers ont d'autant plus de valeur qu'elles se trouvent à proximité de la zone industrielle de Fos en cours d'aménagement.

La zone qui nous intéresse est située à la pointe Sud de Crau. Des gravières sont en cours d'exploitation. Elles atteignent très rarement le niveau de la nappe, mais il est prévu d'exploiter plus profondément la couche utile. Les autorités compétentes se sont donc posé les questions suivantes :

1° Quels seront les niveaux des plans d'eau du fait de la platitude de la topographie ? N'y aura-t-il pas de risque de débordement ?

2° Quels seront les effets sur la nappe ?

A la suite des nombreuses études qui y ont été consacrées, la nappe est assez bien connue, notamment sa piézométrie et l'ordre de grandeur de ses transmissivités. Afin de répondre à ces questions, on a construit un modèle analogique simple de la nappe par la technique du papier conducteur. Différentes configurations des plans d'eau ont été simulées :

— en laissant des bandes de terrain non exploitées;
— en supposant que les berges avals étaient ou non colmatées.

Les niveaux de la nappe et des plans d'eau ont été ainsi déterminés comme on peut le voir à la figure 7.

Contrairement à ce qui se passe pour un plan d'eau unique, c'est lorsqu'il y a colmatage des berges avals que les risques de débordement sont les plus grands.

PLAINE DE TOULOUSE (**)

Cette étude, au contraire, a un but beaucoup plus général. Elle doit permettre de définir les modalités d'une exploitation rationnelle de l'eau et des matériaux sur 80 km de la vallée de la Garonne au voisinage de la ville de Toulouse.

Cette étude est en cours d'exécution, elle doit se dérouler en trois phases :

1/ *Etude systématique, sur des plans d'eau existants, des communications avec la nappe :*

Près de la berge aval de quatre gravières d'âges différents, des stations d'essai ont été implantées : forages et piézomètres. Des pompages d'essai ont été effectués sur chacune d'elles dans le but de détecter et de mesurer d'éventuels colmatages. Il est prévu de tenter de corréler les caractéristiques des gravières et notamment leur âge avec le degré de colmatage.

Nous sommes conscients que les relations mises en évidence ne pourront être appliquées sans vérification à d'autres systèmes aquifères. Par contre, le test des méthodes présente un intérêt tout à fait général.

2/ *Simulation d'une zone limitée :*

Dans le but de définir les modalités de mise en exploitation de gravières au voisinage d'un captage isolé, une étude complète d'une zone de la nappe est effectuée. Il s'agit d'une région encore peu exploitée mais contenant un captage d'eau potable. Après l'étude hydrogéologique complète de la zone, un modèle mathématique est élaboré. Il doit permettre :

— la détermination de la zone d'appel du captage;
— la définition des dimensions et des emplacements des gravières qui sont compatibles avec la présence du captage;
— l'évaluation des vitesses d'écoulement des eaux vers le captage.

3/ *Application des phases précédentes à la définition de règles de répartition des captages et des gravières sur l'ensemble de la plaine et, en particulier :*

— emplacements et dimensions des gravières;
— détermination des captages actuellement menacés;
— zones où l'exploitation des matériaux peut être faite sans entraves.

***

En conclusion, nous pouvons souligner le nombre et l'importance des paramètres qui président aux relations nappes-gravières, ce qui multiplie les cas d'espèces.

Il faut donc se garder de toute affirmation à prétention générale sur l'effet des gravières : elles ne sont en général ni bénéfiques — et à favoriser — ni préjudicielles — et à proscrire. Cela dépend des conditions locales aussi bien que de la configuration donnée aux gravières et de leur position.

Les questions que l'on se pose au sujet de ce voisinage ne peuvent être réglées sans des études cas par cas. Bien que sur certains points essentiels des études méthodologiques seraient très utiles, on dispose de méthodes de mesure et d'interprétation suffisantes pour prévoir, au moins d'une manière approchée, le comportement du système.

(*) Etude entreprise à l'instigation du Service des Mines de Marseille.

(**) Etude réalisée à la demande de l'Agence Financière de Bassin Adour-Garonne, du Ministère de l'Agriculture, Direction Départementale de la Haute-Garonne et du Ministère du Développement Industriel et Scientifique, Arrondissement minéralogique de Toulouse.

Discussion

Président : M. THÉVENIN

M. le Président remercie M. PEAUDECERF de son intéressante communication qui traite d'un sujet de grande actualité.

En effet, dit-il, il faut des quantités croissantes de matériaux de construction, et, en attendant d'autres solutions, il faut aller les chercher dans les plaines alluviales en faisant en sorte que l'exploitation de ces matériaux ne compromette pas l'exploitation des nappes nécessaires à l'alimentation humaine et ne nuisent pas à l'environnement. Afin de préserver les différents intérêts en cause, on est amené maintenant, dans les grandes vallées, à prévoir un véritable « zoning » qui fait sa place à l'exploitation des graviers et du sable, mais de façon que les richesses en eau de ces vallées ne soient pas compromises.

M. le Président ouvre ensuite la discussion.

M. CLOUET D'ORVAL (BURGEAP, Paris) pose la question ci-après :

A propos du colmatage, M. PEAUDECERF a supposé implicitement, dans son exposé, que celui-ci n'était possible que dans le cas où l'écoulement va du plan d'eau vers la nappe. Est-ce toujours le cas ? Le colmatage ne peut-il se produire par simple dépôt gravitaire sur le fond ou les berges en pente de la gravière, indépendamment du sens de l'écoulement d'échange entre gravière et nappe ? M. PEAUDECERF a-t-il des observations *in situ* pour confirmer son point de vue ?

Nous n'avons pas d'observations sur ce point, répond M. PEAUDECERF, mais ce problème mérite d'être examiné. On peut penser que, s'il y a un écoulement provenant de la nappe, le colmatage gravitaire sera peu important; il n'en sera pas forcément de même pour le colmatage biologique ou physico-chimique.

En l'absence d'autres questions, M. le Président clôt la discussion et donne la parole à M. GALLOUEDEC pour l'exposé de sa communication.

Abstract

How gravel pits affect hydrodynamic groundwater behaviour

Alluvial formations are very valuable sources of sand and gravel. They are frequently worked down to groundwater level. The aquifer, which mostly shows promising characteristics, frequently supplies a whole region with drinking water. Quarries in the aquifer system are liable to depress or raise the groundwater level, and especially to affect water qua'ity by chemical or biological factors or by facilitating pollutant inflow. The severity of such effects is directly dependent on the amount of water exchange taking place between the full gravel pit and the aquifer. To evaluate such effects, therefore, it is necessary to establish hydrodynamic relationships existing between the aquifer and surface water.

Author reviews the factors to consider in evaluating such hydrodynamic effects, which include warping of the river banks and bed, depth of excavation and position in relation to the aquifer system, relationships with rivers, shape and dimensions of excavations and position with respect to the general direction of groundwater flow. The effects of these factors vary and can be more clearly visua'ised with the aid of a series of diagrams. River bank and bed warping turns out to be the vital governing factor as regards flow exchange taking place between a gravel pit and aquifers. If warping is taking place the gravel pit is an obstacle to groundwater flow; if not, it acts as a "privileged" flow path.

Present means whereby these parameters can be evaluated are discussed in the second part of the article. Without going into conventional hydrogeo'ogical approaches in detail, special reference is made to local measurement of permeability, vertical permeability distribution through the various ground horizons and, especially, evaluation of river bank and bed warping. Closer methodology, however, seems to be required for some of the points considered.

Interpretation and prediction methods vary from simple ca'culation to use of a three-dimensional model. The usefulness of electrical analogies of the conductive paper model type, which are particularly suitable for this type of problem, is also emphasized.

Reference is made to two very different types of investigation. One relates to a gravel pit extension scheme in the Crau region of France, more especial!y its effects on the local water table level. The other is a more basic study of optimal gravel pit and water supply operation in the Toulouse region, in which the warping problem in quarries and its variation over a period of time are considered. Warping measurements have been carried out on site, from the results of which it is expected that the effects of the gravel pits on present and future water supply yie'ds can be predicted.

Rapport de synthèse général

présenté par

R.-E. Quélennec*

Mots-clés : Planification, Utilisation terrain, Gestion (Gestion régionale), Matériau granulaire
France

Introduction

C'est une lourde tâche qui m'incombe, après les brillants exposés des rapporteurs sur les six thèmes de discussion du 1er Séminaire national sur la "Gestion régionale des sédiments", que de tenter, lors de la séance de clôture, de réaliser la synthèse des travaux et discussions dont l'objet porte sur des milieux aussi variés que les versants de montagne, les réseaux hydrographiques et les littoraux.

Cette difficile mais passionnante gageure, proposée au secrétaire du Conseil scientifique, je vais oser la tenter à travers la présentation d'un rapport qui répond à un double objectif :

— rappeler et synthétiser l'essentiel des éléments les plus significatifs présentés par les rapporteurs ou les auteurs de communication, en les complétant par quelques brèves informations issues de recherches bibliographiques ou d'expériences et réflexions personnelles ;
— proposer une définition des objectifs d'une politique de "gestion régionale des sédiments" et des moyens aptes à favoriser sa mise en œuvre sur le territoire national.

I. - Principales résultantes des interactions entre activités humaines et processus sédimentaires dans les bassins versants et sur le littoral - Rappels

La présentation adoptée pour rappeler brièvement la résultante des principaux types d'interactions entre activités humaines et processus sédimentaires est arbitraire, mais commode. Il était *a priori* tentant d'essayer de classer les impacts des activités humaines en fonction des influences possibles de ces dernières sur les principales composantes des processus sédimentaires : érosion (mobilisation et entraînement) - transport solide (suspension et charriage) - sédimentation (dépôt et consolidation).

On doit rapidement se rendre à l'évidence que bon nombre d'activités humaines interfèrent avec plusieurs composantes de ces processus en raison notamment du caractère "hydraulique" des processus qui fait que le cadre géographique des interactions déborde largement l'espace ponctuel où se situent les activités humaines, et de l'interdépendance, au plan local, des composantes des processus sédimentaires.

* Service géologique régional, Marseille, Service géologique national, BRGM.

I.1. - Interventions sur les versants

Lutte contre l'érosion et la dégradation des terrains de montagne

Le ravinement des pentes soumises à une érosion accélérée dans de nombreux hauts bassins sensibles à l'érosion, spécialement dans les régions méridionales, dégrade progressivement les surfaces dévolues à l'agriculture, à la forêt ou à l'élevage. Les dépôts souvent stériles en provenance des parties hautes érodées s'accumulent au pied des pentes, ou donnent naissance à des "laves torrentielles" qui menacent la sécurité des biens et des personnes. L'urbanisation à des fins touristiques ainsi que l'ouverture incontrôlée de pistes de ski et de voies d'accès dans des zones à fort risque d'instabilité est souvent le point de départ de phénomènes d'érosion accélérée et de glissements de terrains qui pourraient être évités, grâce à une meilleure connaissance des risques naturels dont il convient de développer la cartographie régionale en montagne (voir travaux méthodologiques du BRGM, du CETE et du CEMAGREF).

Le contrôle progressif des phénomènes d'érosion les plus aigus par les moyens variés de "restauration des terrains en montagne" (RTM) est une œuvre de longue haleine qui nécessite de lourds investissements, et s'appuie généralement sur une politique de réservation foncière nécessaire aux travaux de correction "active" pour réaménagement et fixation du sol, revégétalisation et reboisement. Ces modes de correction sont complétés par des ouvrages de correction "passive" (seuils, barrages de sédimentation classique ou à grille), qui tendent à se multiplier et dont l'efficacité pourrait être notablement augmentée, en favorisant l'extraction et la valorisation des blocs et galets stockés derrière les barrages pour des opérations de construction et d'aménagement sur des sites voisins. Des résultats spectaculaires de stabilisation et de reforestation des zones dégradées ont été obtenus depuis la mise en œuvre par l'Office national des Forêts d'une politique RTM à l'aide de crédits du Ministère de l'Agriculture. L'effort est à poursuivre, sinon à intensifier, dans de nombreuses zones montagneuses en voie d'érosion accélérée : il devrait avoir pour objectifs essentiels d'assurer la sécurité des personnes et des biens économiques, de préserver l'environnement ainsi que l'activité traditionnelle en montagne, et de réduire les débits solides généralement délivrés en excès par les torrents issus de ces zones dégradées dans les cours d'eau où alluvionnement et transport solide excessifs créent des nuisances pour les usages aval de la ressource en eau.

Il apparaît donc souhaitable que les interventions ayant pour objet la lutte contre l'érosion en montagne s'inscrivent dans le cadre d'une politique générale d'aménagement des bassins versants et de réhabilitation de la montagne. Les actions à mener devraient permettre à court terme de réduire les transferts vers l'aval des sédiments issus des zones d'érosion concentrée les plus "productives", mais aussi de faire en sorte que soient, à plus long terme, conservées ou protégées de l'érosion les zones à fort potentiel d'instabilité ou de susceptibilité à l'érosion, qu'il convient de localiser.

Le domaine montagnard étant un domaine vulnérable, il importe en effet que le zonage des risques naturels et la planification des actions de protection et de restauration des zones sensibles permettent au gestionnaire et à l'aménageur d'éviter de lancer aujourd'hui des opérations dont les conséquences néfastes devraient être supportées par les générations futures.

Déforestation et agriculture

L'extension de l'agriculture sur des zones végétalisées et pentues, ainsi que la déforestation ou la suppression des haies et bocages lors des opérations connexes de remembrement conduisent bien souvent à l'augmentation du volume des terres érodées, au comblement des réseaux de drainage et d'évacuation des eaux d'écoulement et à l'augmentation du débit des cours d'eau aval. Afin de réduire ces effets, il est souhaitable que ces opérations d'aménagement ou de mise en valeur soient conduites avec le souci de limiter l'érosion des sols agricoles, de façon à ne pas augmenter significativement les flux de sédiments évacués initialement à l'aval des zones dont l'affectation d'usage a été modifiée.

Urbanisation et transports

Durant les périodes de chantier et de construction pour des opérations importantes d'urbanisation ou de création de voies nouvelles, de grandes surfaces du sol perdent leur protection végétale initiale, sont déplacées, perdent leur cohésion, et sont de ce fait plus sensibles à l'effet de l'érosion hydrique. La résultante est l'accroissement de la production de sédiments, leur transport par voie hydraulique et leur dépôt dans les zones ou les réseaux aval.

Après achèvement des chantiers, des modifications dans le régime d'infiltration et d'écoulement vers l'aval sont apportées en raison de l'imperméabilisation et de la concentration des eaux évacuées par les nouveaux réseaux.

De cette modification de la concentration des flux, résultent des érosions et des dépôts dans les réseaux naturels ou artificiels situés à l'aval, ce qui augmente les coûts de leur maintenance et crée des nuisances pour les usagers aval de la ressource en eau.

Il y a donc intérêt à ce que ces opérations d'aménagement soient réalisées de telle sorte que la production de sédiments issus de ces zones n'excède pas le niveau d'origine.

Activités minières

L'enlèvement de la protection végétale des sols lors de l'ouverture d'exploitations minières à ciel ouvert contribue à accélérer l'érosion des sols. L'érosion des terres végétales déplacées ou stockées, ainsi que l'érosion des stocks de stériles issus d'exploitations minières, augmentent, si les précautions indispensables ne sont pas prises, la production et le transfert de sédiments vers l'aval des exploitations.

Le rejet direct des eaux d'exhaure ou d'abattage hydraulique, sans décantation, augmente également la turbidité des réseaux aval et favorise l'érosion localisée de ces derniers en raison de

l'adaptation progressive des profils de ces réseaux aux nouvelles conditions de débit.

Ces impacts négatifs — augmentation de la turbidité, de l'érosion et des dépôts dans les réseaux aval — doivent pouvoir être identifiés dès l'établissement des projets d'exploitation minière. Les mesures correctrices nécessaires — bassins de décantation, protection des sols et des digues de stockage, réaménagement et protection des réseaux aval... — doivent être mises en place au moment de la réalisation des diverses phases d'exploitation.

Rejets des activités domestiques, industrielles, agricoles

Les rejets de matières en suspension des activités industrielles et domestiques dans les cours d'eau donnent lieu à la perception de redevances par les Agences de Bassin ; ces redevances perçues au titre de programmes de lutte anti-pollution permettent aux Agences de contribuer à aider financièrement les opérations visant à réduire la pollution "concentrée" produite et rejetée dans les milieux aquatiques.

Les activités agricoles individuelles ne sont pas concernées par cette taxation qui ne touche que les gros préleveurs individuels ou collectifs. La pollution totale par les matières en suspension résultant de l'activité agricole peut être, bien que non évaluée quantitativement à l'heure actuelle, considérée comme non négligeable, spécialement dans les régions méridionales soumises à fortes précipitations concentrées, ainsi que dans les zones agricoles pentues revêtues de sols à matrice fine et de faible cohésion. Des études sur ce point s'avèrent nécessaires de façon à parvenir à l'évaluation de ce problème de pollution "diffuse" liée à l'érosion des terres agricoles et au choix des moyens curatifs.

Les produits polluants résultant des rejets des activités industrielles, domestiques et agricoles peuvent être fixés et véhiculés par l'intermédiaire des sédiments fluviatiles. Il en est ainsi, notamment des pesticides, des oligo-éléments métalliques et des radionucléides artificiels, pour lesquels les sédiments jouent, en fonction de leur granulométrie, le rôle de piège et de vecteur de matières toxiques et inhibitrices.

La pollution des sédiments affecte la vie des organismes endobenthiques dont le sédiment constitue le milieu de vie, ainsi que l'intensité et la qualité des échanges physico-chimiques qui ont normalement lieu à l'interface eau-sédiment dans les cours d'eau, les réservoirs ainsi que dans les milieux estuarien et marin. Les modifications de la "qualité" des sédiments introduisent donc des variations dangereuses dans le métabolisme des peuplements aquatiques, éléments de la chaine alimentaire. Certains organismes ont, en effet, la capacité de concentrer plusieurs centaines de fois les teneurs en métaux lourds toxiques fixés par les sédiments, ce qui crée des situations défavorables au développement "normal" des processus biologiques.

Dans le cas de pesticides provenant des zones agricoles traitées (DDT) ou des rejets industriels (PCB), on considère que leur transport vers l'aval dans les cours d'eau peut se faire essentiellement par l'intermédiaire des sédiments en suspension qui contiennent en concentration jusqu'à 10 000 fois plus de pesticides que l'eau en solution, en raison des fortes capacités d'adsorption des polluants organiques par les argiles et les particules organiques, et de la faible solubilité de ces polluants dans l'eau.

Le contrôle de la qualité du milieu sédimentaire fait donc partie des outils nécessaires à la gestion des milieux aquatiques.

I.2. - Aménagements hydrauliques

Rectification de tracé, endiguements, protection des berges des cours d'eau

Toute opération de rectification de méandres conduit à diminuer la longueur du lit, donc à augmenter la pente ainsi que la capacité de transport, ce qui a pour effet d'initier des processus locaux d'érosion du lit dans les cours d'eau à fond mobile.

Le même effet résulte des opérations d'endiguement en raison de l'augmentation de vitesse due à la diminution de la section mouillée pour les hauts débits.

Les revêtements de berges sujettes à érosion peuvent également favoriser les processus d'érosion du lit du cours d'eau dont le débit, localement accéléré, tend à rétablir son niveau de saturation par prélèvement de matériaux sur le fond.

Les processus d'érosion initiés par ces diverses opérations peuvent se propager assez loin vers l'amont en affectant lit et berges du cours d'eau, ainsi que ceux de ses affluents supérieurs.

Les effets négatifs de ces opérations d'aménagement peuvent être limités ou évités, grâce notamment à une bonne connaissance des processus sédimentaires prévalant dans les zones à aménager (degré d'instabilité), causes, importance des débits solides) et à la maitrise des modèles de simulation de l'évolution morphologique des fonds alluviaux.

Dérivation

La dérivation de quantités importantes de débit d'un cours d'eau naturel vers un autre système d'écoulement ou de distribution des eaux s'accompagne souvent des effets suivants :
— modification de la morphologie du lit des cours d'eau à l'aval de la prise : engravement du lit lié à la réduction de la vitesse et création d'un nouveau chenal d'écoulement de dimensions réduites dans l'ancien lit ;
— diminution de l'apport de sédiments au littoral par le cours d'eau d'origine, ce qui peut créer des conditions favorables à l'érosion des plages ;
— augmentation de la sédimentation (éléments fins) à proximité de l'exutoire du nouveau système d'évacuation.

Les moyens techniques permettant de limiter ou de corriger les impacts négatifs ci-dessus mentionnés existent : dragages et ouvrages de protection du lit - ouvrages de défense des côtes - alimentation artificielle - bassins de décantation ou de délimo-

nage. Bien que la mise en œuvre de ces moyens soit parfois coûteuse, il convient de prévoir leur réalisation et de prendre en compte leur coût dès l'établissement des projets de dérivation.

Ouvrages réservoirs

Ils ont pour effet "amont" d'interrompre totalement dans la zone du remous, en tête de la retenue, le charriage des cours d'eau qui s'y jettent et de stocker la majeure partie des sédiments en suspension dans ces cours d'eau. Les sédiments charriés ainsi stockés en tête de retenue peuvent être valorisés grâce à des opérations d'extraction contrôlées qu'il convient de favoriser.

L'alluvionnement de la retenue par les sédiments fins, s'il est bénéfique pour les usagers aval qui disposent généralement d'une eau moins turbide, diminue progressivement l'efficacité et la durée de vie de l'ouvrage hydraulique. Afin de remédier au comblement de la retenue, il est habituellement procédé à des opérations régulières et coûteuses de curage mécanique ou hydraulique, ou à des vidanges et chasses par ouverture de vannes de fond.

Des programmes plus ambitieux ayant pour objet la protection des terrains amont contre l'érosion devraient systématiquement accompagner, sinon précéder, la réalisation des programmes de construction des retenues hydrauliques dans les bassins versants soumis à érosion intense.

La qualité de l'eau et des peuplements aquatiques dans les réservoirs est en partie liée aux échanges qui s'établissent à l'interface eau-sédiments de fond, et qui conditionnent notamment le bilan global en oxygène des réservoirs. Le contrôle régulier de la nature et des caractéristiques des dépôts sédimentaires, de leur état d'oxydo-réduction ainsi que de leur capacité de stockage et d'échange en matière organique, composés azotés, phosphorés et produits toxiques, permet d'améliorer la prévision et le contrôle de la qualité des milieux lacustres naturels ou artificiels.

Les effets "aval" liés à la rétention des sédiments dans les barrages-réservoirs sont fonction du changement des conditions de débit et de charge solide des eaux à la sortie de la retenue. Les épisodes de lâchure de fortes pointes de débits faiblement chargés en matières en suspension peuvent occasionner une remise en suspension progressive des sédiments de faible granulométrie stockés provisoirement dans le lit à l'aval de la retenue et initier l'érosion du lit et des berges sur des tronçons de rivière importants. Dans le cas de barrages écrêteurs de crue, on notera au contraire une tendance à l'engravement du lit à l'aval de la confluence avec des affluents à fort débit solide. Tout ouvrage de régulation hydraulique concourant à réduire les pointes de crue d'un cours d'eau a pour effet de réduire considérablement la capacité de transport solide de ce dernier.

Les vidanges des retenues, ainsi que les chasses d'eaux à forte turbidité, ont des impacts négatifs certains sur les milieux aquatiques qu'elles affectent en aval : augmentation de la turbidité des eaux — colmatage du lit, des prises d'eau et des champs captants — atteinte à la faune et à la flore. Ces opérations, si elles s'avèrent nécessaires à échéance plus ou moins régulière, exigent un contrôle rigoureux de leur réalisation de façon à éviter ou limiter au maximum les impacts à un niveau de nuisance jugé "admissible" par les usagers aval.

La rétention d'une partie importante du débit solide d'un cours d'eau dans les retenues artificielles contribue au déséquilibre de l'alimentation en sédiments du littoral et peut occasionner l'érosion régressive des plages et cordons littoraux. Dans le cas de barrages d'estuaire, on peut au contraire assister à des phénomènes d'exhaussement des fonds à l'aval en raison notamment de la réduction des effets de chasse sur les sédiments marins piégés dans l'estuaire.

Les retenues hydrauliques illustrent bien la variété et l'étendue du champ spatial des interactions entre aménagements et processus sédimentaires. L'appréciation objective des impacts résultant de la réalisation de barrages-réservoirs passe donc bien également par la connaissance précise des caractéristiques des processus sédimentaires avant et après aménagement.

I.3. - Extraction de granulats en milieu alluvial

Les extractions de sables et graviers dans le lit mineur des cours d'eau conduisent, si des précautions ne sont pas prises, aux principaux impacts négatifs suivants :
— abaissement du lit accompagné d'érosion régressive (amont), progressive (aval) et d'érosion de berges ;
— destruction des peuplements benthiques, aquatiques et de la sylve au niveau de l'exploitation : dégradation du milieu naturel ;
— déstabilisation d'ouvrages d'art situés à proximité de l'exploitation (ponts, digues, prises d'eau...) ;
— pollution par les MES à l'aval de l'exploitation avec les effets résultants suivants : appauvrissement du milieu piscicole - colmatage du lit - impacts sur les utilisateurs aval en raison de l'augmentation de la turbidité de l'eau ;
— abaissement du niveau des nappes aquifères ;
— déficit sédimentaire du littoral en cas d'extraction située près des embouchures.

Il est possible de réduire certains de ces impacts grâce à l'utilisation judicieuse de l'éventail des mesures suivantes :
— implantation des chantiers d'extraction dans des secteurs sujets à engravement naturel, ou situés à l'amont des réservoirs naturels et artificiels, ou encore derrière les barrages de sédimentation de montagne ;
— extraction réalisée entre seuils artificiels destinés à stabiliser le profil en long des cours d'eau, dans la mesure où peuvent également être corrigées les nuisances secondaires créées par ces seuils (modification des cotes de crue et des niveaux piézométriques - colmatage du milieu alluvial entre seuils...) et où peut être résolu le problème de la maintenance des seuils, une fois l'exploitation achevée (transfert sur la collectivité de charges nouvelles) ;
— limitation des extractions aux apports solides annuels avec contrôle régulier des profils du lit et mise en œuvre d'ouvrages

de protection de la stabilité du lit et des berges dans la zone d'influence du chantier... ;
— conduite des extractions de manière à ce que le flux de MES à l'aval des chantiers n'excède pas le flux naturel venant de l'amont, ce qui interdit pratiquement toute extraction dans les lits mineurs.

Le respect de ces principales dispositions doit permettre la réduction significative du niveau des nuisances créées par l'exploitation des granulats dans le lit des rivières. L'application progressive, mais stricte, de ces mesures, devrait permettre de favoriser le départ de la majeure partie des exploitations des lits mineurs des cours d'eau, et leur transfert vers les gisements alluvionnaires de terrasses ou de plaines. Cette solution crée de nouveaux conflits d'intérêt, car ce type d'exploitation s'oppose à l'utilisation agricole des sols, ainsi qu'à celle du gisement alluvionnaire comme réservoir aquifère et source d'approvisionnement en eau potable. Il faut donc que des procédures de concertation et d'aide à la décision permettent d'arbitrer entre ces diverses demandes d'utilisation concurrentielles des milieux aquatiques, du sol et du sous-sol.

Une autre solution consiste à favoriser l'exploitation de granulats d'origine marine ou celle de roches massives, de façon à combler le déficit de production que créerait l'abandon progressif des extractions de sédiments dans le lit des cours d'eau. Cette alternative, qui aurait l'avantage de permettre la préservation des milieux aquatiques, a pour corollaire le report des nuisances sur le milieu marin ou les milieux collinaires et montagnards, et la nécessité d'une réorganisation et reconversion technique de la profession.

I.4. - Aménagements et utilisation des eaux de surface

Prises d'eau et réseaux de distribution pour usages domestique, industriel, énergétique et agricole

Les usages domestiques et industriels de l'eau nécessitent que l'eau prélevée dans les cours d'eau soit filtrée et traitée afin de la débarrasser de la majeure partie des matières en suspension. Les investissements, ainsi que les coûts de fonctionnement et de maintenance des installations de traitement et d'évacuation des boues sont élevés et sont répercutés sur les usagers. Toute réduction importante de la concentration des matières en suspension dans les eaux de rivières a donc une incidence bénéfique sur les coûts de production de ces secteurs d'activité dont l'alimentation en eau dépend essentiellement des eaux de surface.

Pour les aménagements à buts multiples (production énergie industries - eau potable - irrigation), des bassins de délimonage de coût et d'entretien élevés s'avèrent le plus souvent nécessaires en tête des réseaux de distribution.

Les prises d'eau et réseaux artificiels pour irrigation nécessitent entretien et curages périodiques afin de les débarrasser des sédiments déposés en excès. Ces opérations de maintenance sont en général coûteuses et seraient allégées par une réduction notable des matières en suspension transportées par les cours d'eau et dérivées dans les canaux. A l'inverse, il faut noter qu'une eau trop "claire" risque d'augmenter la prolifération d'algues dans les canaux et d'altérer leur étanchéité en cas de non-revêtement et de vitesses excessives.

Dans le cas de systèmes d'irrigation par aspersion, il est reconnu qu'un taux élevé de matières en suspension dans les eaux prélevées conduit à réduire l'efficacité des équipements et à modifier la qualité des produits agricoles.

Le cas des aménagements hydro-électriques a été rappelé dans le paragraphe 2.2. (Barrages réservoirs) : pour ces aménagements également, toute réduction des flux solides des cours d'eau à l'amont des barrages s'avère bénéfique.

Navigation - Transports fluviaux

Le maintien de la navigabilité, par la garantie du tirant d'eau, des canaux et rivières canalisées, nécessite la réalisation régulière de travaux de curage par dragage dont la fréquence est fonction des conditions hydrodynamiques d'écoulement qui conditionnent charriage et dépôt et de la concentration en sédiments des eaux. Une diminution de la turbidité moyenne des eaux à l'entrée des systèmes de navigation est un facteur de réduction du coût des opérations de maintenance. Ce facteur d'économie est d'autant plus important que les concentrations en matière en suspension sont élevées.

Pour cette utilisation de l'eau, comme pour les utilisations citées précédemment, il serait souhaitable d'étudier de quelle manière varient les dépenses d'entretien des ouvrages et les frais de fonctionnement des installations de traitement de l'eau en fonction des variations de concentration des matières en suspension de l'eau superficielle prélevée ou dérivée.

Activités piscicoles et de loisirs dans les milieux aquatiques

Les processus d'érosion et de sédimentation rapide dans les cours d'eau et les réservoirs perturbent et dénaturent la qualité du milieu sédimentaire qui sert à la fois aux poissons de source de nourriture, de support pour la végétation aquatique qui constitue leur habitat privilégié, et de lieu de frayère et de ponte. De la pollution des sédiments et de l'instabilité des fonds des cours d'eau résulte donc le dépeuplement de la faune piscicole ainsi que de la flore.

L'excès de turbidité dans les cours d'eau et les réservoirs entraîne également la disparition de la flore, le dépeuplement des espèces piscicoles dites nobles, et donc l'appauvrissement de la faune qui peut même disparaître complètement pour de fortes valeurs de la turbidité préjudiciables à son métabolisme.

La fréquentation touristique des milieux aquatiques étant assez intimement liée aux activités de pêche, aux sports nautiques ainsi qu'aux plaisirs de la baignade et de la contemplation, il est reconnu que la réduction de la turbidité de ces milieux augmente leur valeur touristique.

I.5. - Aménagement et utilisation des embouchures fluviales

Les embouchures fluviales, zones de mélange eau douce-eau salée, peuvent être soit du type "estuarien", soit du type "deltaïque" selon que leur dynamique est à dominante marine ou fluviale.

Cas des estuaires

Ils comprennent les embouchures de la côte atlantique où la forte amplitude des marées amplifie les phénomènes de mélange eau douce-eau salée. L'hydrologie des estuaires, de nature complexe, dépend notamment de leur morphologie, du apport débit fluvial/prisme de marée, ainsi que des circulations résiduelles fonction elles-mêmes des conditions de stratification résultantes et de l'intrusion saline.

Les processus de charriage des sables dans les estuaires sont mal connus : ils font intervenir les transports vers l'aval de sédiments fluviatiles et leur dépôt spécialement dans la partie amont de l'estuaire, ainsi que le transport vers l'amont de sables marins dans la partie aval de l'estuaire sous l'action des courants de flot. La convergence des apports et stockages de sédiments se fait au voisinage du "point nodal" dont la position variable dans l'estuaire est fonction du débit fluvial et de l'intrusion marine.

Le transport et le dépôt des sédiments en suspension d'origine essentiellement fluviatile dans la plupart des estuaires est régi par la circulation résiduelle de fond dirigée vers l'amont dans la zone amont de l'intrusion saline. A ce niveau, il se produit une concentration des sédiments en suspension qui donne naissance au "bouchon vaseux", qui migre vers l'aval sous l'action du jusant et vers l'amont sous l'action du flot et peut être évacué en mer par forts débits fluviaux.

La connaissance quantitative du bilan global des flux et stockages saisonniers ou annuels de sédiments fluviatiles ou marins dans les estuaires français est encore très imprécise. Toute aussi méconnue est la connaissance qualitative des milieux estuariens où le stockage des sédiments peut créer des états de pollution intolérables, en raison du rôle de piège, de concentrateur et de vecteur de polluants joué par les sédiments vis-à-vis de certains pesticides, métaux et radionucléides.

Rappelons également l'importance des sédiments dans les processus d'eutrophisation des milieux estuariens, par l'intermédiaire des phénomènes d'adsorption et de désorption des phosphates sur les sédiments. Ces derniers jouent un rôle tampon dans la variation des concentrations en phosphate dissous dans l'eau.

Les modifications de la morphologie des estuaires par dragage de chenaux de navigation ou aménagements portuaires induit des perturbations plus ou moins importantes dans les régimes hydrologiques et sédimentologiques, pouvant donner lieu aux effets résultants suivants :
— modification de la circulation résiduelle, de la turbidité et du marnage ;
— modification de l'intrusion saline ;
— modification des conditions d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments dans l'estuaire ;
— modification de la morphologie et de l'écologie de l'estuaire.

Les aménagements hydrauliques dans les bassins versants, notamment les retenues, peuvent avoir pour conséquence, en réduisant les pointes de crue, de diminuer le renouvellement des eaux de l'estuaire et de limiter l'effet salutaire de purge. Il est encore hasardeux de préjuger, dans l'état actuel des connaissances, de l'impact d'une réduction significative des concentrations de sédiments fluviatiles apportés en suspension dans les estuaires sur la morphologie et la biologie de l'estuaire et des littoraux avoisinants. Des études sur ce thème s'avèrent nécessaires. Elles permettraient de mieux appréhender les effets aval qui résulteraient d'interventions ayant pour objet une meilleure protection des sols dans les bassins versants, et de limiter la composante négative de ces effets.

Cas des deltas

Le caractère "deltaïque" des embouchures fluviales des cours d'eau de la côte méditerranéenne est dû à la faiblesse de l'onde de marée et au caractère dominant des flux d'origine fluviale.

Les sédiments fluviatiles transportés par charriage et suspension sont évacués directement au niveau du littoral, ce qui donne une morphologie d'embouchure de type rectiligne ou concave selon la capacité des houles et des courants à redistribuer les sédiments fluviatiles le long du littoral.

Le faible marnage réduit considérablement la zone de mélange entre eau douce et eau salée, ce qui a pour conséquence de réduire les phénomènes oscillatoires de stockage de sédiments piégés dans l'embouchure.

Toute rétention artificielle de sédiments à l'amont de l'embouchure, qui se traduit par une diminution significative de l'alimentation du littoral par des sédiments fluviatiles, a pour effet résultant une modification de la morphologie de l'embouchure et du littoral associé, qui peut se traduire par une érosion significative des rivages (voir notamment le cas du delta du Nil, après la construction du barrage d'Aswan). Ceci est d'autant plus sensible que le déficit d'alimentation est important et porte sur des sédiments grossiers transportés par charriage.

I.6. - Aménagement et utilisation du littoral

Les littoraux peuvent être considérés comme un ensemble de "provinces sédimentaires" ou d'unités plus ou moins indépendantes dont l'équilibre morphologique est fonction du bilan sédimentaire à l'intérieur de ces unités. Deux provinces sédimentaires voisines peuvent être considérées comme indépendantes quand le transfert de sédiments de l'une à l'autre est négligeable ou nul. Le bilan sédimentaire d'une province dépend essentiellement des apports extérieurs de sédiments fluviatiles ou marins ainsi que des conditions de transport ou de

dépôt des sédiments à l'intérieur ou vers l'extérieur de la province. Ces conditions sont liées au régime hydrodynamique littoral, fonction à la fois des houles, courants, marées, mais aussi de la morphologie littorale, de la granulométrie et de la cohésion des sédiments en place. De la modification des caractéristiques (intensité, durée...) d'un des facteurs qui conditionnent les termes du bilan sédimentaire peut résulter une variation dans la morphologie littorale. Par ailleurs, le rejet de substances polluantes par l'intermédiaire des cours d'eau ou directement sur le littoral affecte l'équilibre biologique des provinces sédimentaires littorales.

Aménagements littoraux - Protection et défense des côtes

Les ouvrages transversaux du type jetées, épis, émissaires, constituent des obstacles artificiels au transit littoral, qui créent des accumulations en amont de l'ouvrage et des déficits, d'où érosion, en aval (direction de la composante nette du transit littoral).

Les ouvrages littoraux du type longitudinal (murs, perrés, digues de protection...) peuvent accélérer les transports de sédiments dans le profil des plages en raison de la composante réfléchie de la houle, et occasionner des érosions locales.

La destruction des herbiers de posidonies en Méditerranée ou des champs d'algues sur les côtes occidentales, par le fait de pollutions, d'enfouissement, de dragages, chalutages... contribue à l'augmentation du degré de mobilité des sédiments sous l'action des houles et des courants, et augmente la susceptibilité des côtes sableuses à l'érosion.

Les installations pour aquaculture situées dans des zones littorales abritées, ou dans les estuaires, peuvent modifier de façon significative les circulations hydrodynamiques locales ainsi que les échanges sédimentaires, et favoriser des processus locaux de dépôt ou d'érosion.

Les opérations d'extraction de sables et graviers sur les littoraux se révèlent particulièrement dangereuses pour l'équilibre des plages. Réalisées en mer, ces opérations d'extraction occasionnent des modifications de la morphologie des fonds marins, de leur peuplement benthique et pélagique, ainsi que des modifications dans la dynamique sédimentaire au voisinage des souilles d'extraction qui peuvent menacer la stabilité du littoral.

Les aménagements dans les bassins versants ou les embouchures, qui réduisent de façon significative les quantités de sédiments fluviatiles utiles à l'équilibre morphologique de certaines provinces sédimentaires littorales, ont un impact négatif sur la stabilité des littoraux de ces provinces.

Toute opération de protection des côtes contre l'érosion étant caractérisée par des coûts financiers élevés qui sont répercutés sur les collectivités régionales ou nationales, il importe donc de garantir la cohérence des actions menées par les divers acteurs économiques dans les bassins versants et sur les littoraux associés. Il ne devrait plus être possible d'éviter, lors de l'établissement d'un projet, d'apporter une réponse à la question suivante : quels peuvent être les impacts prévisibles du projet sur l'équilibre (écologique, morphologique...) des milieux amont et aval, sans limiter *a priori* les limites des zones susceptibles d'être influencées par le projet.

II. - Propositions pour la mise en œuvre d'une politique de gestion régionale des sédiments

Les travaux du Séminaire ont permis de mettre en évidence les aspects quantitatifs et qualitatifs des interactions entre les processus sédimentaires d'érosion - transport solide - sédimentation et les activités humaines. Dans le but de mieux appréhender ces interactions et de limiter les effets négatifs qui peuvent en résulter, il apparaît souhaitable d'entreprendre ou de développer progressivement un certain nombre d'actions dans les domaines scientifique, technique, réglementaire, économique et administratif.

Ces actions devraient faciliter, conjointement au développement de la politique de gestion des eaux, la mise en œuvre d'une politique de gestion régionale des sédiments, dont une définition des objectifs fondamentaux pourrait être la suivante :
— lutter contre l'érosion concentrée et diffuse dans les bassins versants et sur les littoraux ;
— préserver l'équilibre des milieux aquatiques ;
— limiter les impacts des ouvrages et aménagements sur l'environnement et optimiser leur fonctionnement ;
— favoriser la concertation et faciliter l'arbitrage entre les utilisateurs de la ressource : sous-sol, sol et eaux intérieures et marines.

II.1. - Au plan scientifique

Il convient d'associer chercheurs et hommes de terrain dans un effort de recherche soutenu sur les thèmes suivants :
— évaluation des risques d'érodabilité des formations superficielles et modélisation ;
— étude et modélisation des transports de "laves torrentielles" ;
— méthodologies de mesure *in situ* et d'évaluation des charriages de fond et des transports en suspension dans les rivières et estuaires ;
— modèles physiques et mathématiques d'évaluation des transports solides et de représentation de l'évolution morphologique des lits de rivière et des profils de plage ;
— étude des comportements de matériaux cohésifs sous l'action des pluies, courants et houles ;
— rôle des sédiments fluviatiles et marins comme pièges et vecteurs de pollution (pesticides, métaux lourds, radionucléides) ;
— rôle des sédiments fluviatiles fins comme support d'éléments métalliques provenant de l'érosion ou de l'altération de

gisements métallifères, et méthodologie de prospection géochimique de ces gisements ;
— rôle des sédiments fluviatiles fins pour l'équilibre des estuaires et littoraux ;
— étude des bilans sédimentaires de bassins et des provinces littorales ;
— rôle des matières en suspension dans l'exportation des composés azotés et phosphatés par les réseaux hydrographiques - processus d'eutrophisation des lacs et estuaires.

II.2. - Au plan technique

Les actions précédemment citées doivent aller de pair avec la mise en place et le développement progressif de réseaux d'observation et d'acquisition de données permettant l'évaluation :
— des transports solides (suspension et charriage) dans les cours d'eau et les estuaires ;
— de l'évolution morphologique des versants instables, des lits des cours d'eau, estuaires et littoraux ;
— du degré de pollution des sédiments fluviatiles et littoraux.

Parallèlement à la réalisation de cet effort de mesure et d'analyse, il conviendrait de développer les inventaires et représentations régionales des risques naturels dans les zones sensibles à fort risque d'instabilité (bassins versants, réseaux hydrographiques et littoraux).

Il est également souhaitable de poursuivre la réalisation des inventaires des gisements alluvionnaires exploitables, et de mettre en place les moyens de contrôle des quantités de sédiments extraites des milieux aquatiques.

La valorisation de ces diverses données serait facilitée grâce au développement, au niveau de chaque grand bassin hydrographique et de son littoral associé, d'un système d'information du type banque de données, ouvert à tous les utilisateurs potentiels.

Conjointement à cet effort d'information, devraient être favorisées la recherche, la mise au point et la mise en œuvre de moyens techniques et de modes d'exploitation permettant de lutter contre l'érosion concentrée en montagne, et de diminuer la production diffuse de sédiments issus notamment des zones agricoles et des chantiers de construction.

Enfin, il apparaît indispensable que toute action de planification-concertation de type plan de val.. ou schéma d'aménagement de bassin ou de littoral, qui servent de base à l'élaboration des documents d'urbanisme opposables aux tiers, associe plus étroitement que par le passé les objectifs de gestion des sédiments à ceux, plus classiques, des milieux hydrauliques.

II.3. - Au plan réglementaire

Deux types d'actions peuvent être envisagées :
— l'une consiste à inclure le sédiment dans la liste des substances polluantes dont l'émission concentrée ou diffuse dans les réseaux hydrographiques, du fait d'activités humaines, doit être combattue à l'aide de moyens techniques et contrôlée par les Services de l'Administration ;
— l'autre, complémentaire, conduit à la nécessité de réaliser une étude d'impact pour tout objet d'exploitation ou d'aménagement susceptible de modifier les conditions de stabilité des terrains et rivages ou les caractéristiques des processus d'érosion - transport solide - sédimentation existante dans la zone d'influence du projet (milieux continentaux, aquatiques et littoraux).

On notera que ces mesures ne pourront être réellement efficaces que dans l'hypothèse où les agents chargés d'instruire les dossiers, disposeront d'informations suffisantes, notamment sur l'état des milieux (aspects qualitatifs et quantitatifs), ainsi que sur les processus sédimentaires en cours, avant la réalisation du projet (état initial). Cette base d'information nécessaire devrait leur être fournie par les banques de données régionales sur les processus et milieux sédimentaires.

II.4. - Au plan économique

Afin de pouvoir mener à bien les actions citées précédemment et d'entreprendre conjointement des actions volontaristes complémentaires ayant pour objet la protection, la conservation et la restauration des milieux continentaux ou littoraux sujets aux impacts négatifs de certains processus d'érosion-sédimentation naturels ou influencés, il convient de dégager des ressources financières suffisantes.

La recherche de ces ressources financières d'origines diverses pourrait correspondre à trois motivations :

Amélioration du service public

Grâce notamment à l'intensification des efforts de recherche (*cf.* II.1.), à la création et à la gestion des réseaux d'information, d'acquisition et de banque de données (*cf.* 3.2.), à la réalisation d'inventaires et d'études synthétiques sur des milieux et processus sédimentaires (*cf.* II.2.)... Ces diverses actions coordonnées devraient bénéficier d'un financement public, tant par l'Etat que par les collectivités régionales, afin de tenir compte de la spécificité régionale des problèmes à résoudre et du coût des opérations de protection, conservation et restauration des versants et milieux aquatiques.

Incitations financières

Associées aux instruments réglementaires, elles devraient permettre de limiter les pertes en sol et de préserver l'équilibre sédimentaire biologique et morphologique des milieux aquatiques. Ces incitations pourraient prendre la forme de taxations ou de redevances appliquées à tout acteur économique dont l'activité, dans les bassins versants, modifie significativement les caractéristiques des processus sédimentaires dans les milieux aquatiques du fait notamment :
— d'une accélération des processus d'érosion des formations superficielles ;

— de rejets de sédiments dans les réseaux hydrographiques ;
— de stockage ou de prélèvement de sédiments préjudiciables à l'équilibre des milieux aval (réseaux hydrographiques et littoral).

Ces incitations financières ne devraient en aucun cas dispenser l'acteur économique des réparations pour préjudices causés à autrui.

Solidarité des usagers de bassin

Les opérations de lutte contre les érosions concentrées ou diffuses dans les bassins versants et les réseaux hydrographiques conduiront, à terme, à la diminution des transports solides par suspension dans les cours d'eau.

De nombreux usagers de la ressource en eau tireront un avantage économique de cette réduction de la turbidité ; ce sont essentiellement ceux qui prélèvent de l'eau dans les réseaux superficiels pour des utilisations domestiques, industrielles ou agricoles collectives, ainsi que ceux qui dérivent ou stockent de l'eau à des fins notamment de navigation, d'irrigation ou de production d'énergie.

Il apparaît, dès lors, logique que ces acteurs économiques participent, par le biais d'une redevance sur les quantités d'eau prélevées, dérivées ou stockées, aux efforts d'aménagement et de protection des bassins, des réseaux hydrographiques et des littoraux, efforts issus d'une volonté de concertation et de planification régionale qui devraient être soutenus grâce, notamment, au produit financier du nouveau système de taxations et redevances proposé précédemment.

Un tel système d'incitations financières devrait permettre de compléter et de valoriser l'utilisation de certaines disponibilités financières existant actuellement sous la forme de redevances des Agences de Bassin ou des produits de la "Taxe parafiscale sur les Granulats".

II.5. - Au plan de l'organisation des moyens de gestion régionale des sédiments

Les propositions énoncées précédemment supposent que soit définie une organisation apte à utiliser, valoriser et gérer les moyens humains, techniques, réglementaires, économiques, à mettre en œuvre afin de parvenir à une véritable gestion des sédiments.

Il apparaît souhaitable que cette organisation puisse intervenir dans une unité de gestion qui corresponde au cadre naturel des bassins hydrographiques et des littoraux associés de façon à obtenir une vue globale des phénomènes et à maîtriser l'ensemble des problèmes sédimentaires qui débordent généralement les limites administratives arbitraires. Il est nécessaire que cette unité de gestion ait une taille suffisante, du type de celle des Agences de Bassin, par exemple, pour que la solidarité des usagers libère des ressources financières significatives permettant d'entreprendre des actions d'aménagement efficaces et suivies.

L'organisme chargé de mettre en œuvre les éléments d'une politique régionale des sédiments devrait associer dans ses structures de discussion, de coordination et de décision, des représentants des services administratifs, des collectivités locales, ainsi que des principaux groupes d'usagers de la ressource en eau et des sédiments des milieux continentaux et littoraux.

L'élaboration des programmes d'intervention pourrait être réalisée par une structure technique légère, chargée également de la mise en œuvre et de la gestion des réseaux et systèmes d'acquisition et de banque de données. Il est essentiel que cette structure technique à vocation de service public soit multidisciplinaire et compétente pour les aspects quantitatifs et qualitatifs liés aux risques naturels et aux processus sédimentaires dans les milieux continentaux et littoraux. La représentation régionale de cette structure technique faciliterait l'élaboration concertée des schémas d'aménagement, l'instruction des dossiers d'impact et la liaison avec les collectivités locales et les services administratifs représentés au niveau de la région ou du département. Cette liaison régulière à des fins de concertation pourrait prendre la forme de conférences inter-administratives bimensuelles ou mensuelles, ayant pour objet d'assurer "police et gestion des sédiments" dans les milieux continentaux et littoraux.

La mise en place des financements, ainsi que le choix de la maîtrise d'ouvrage pour des opérations de protection, de conservation ou de restauration des milieux continentaux, réseaux hydrographiques et milieux littoraux, serait du ressort de la structure chargée de coordonner la politique de gestion des sédiments au niveau de l'unité de gestion constituée par le bassin hydrographique et son littoral associé.