

Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques rudimentaires

**M. P. BORDAS, A. E. LANNA &
F. R. SEMMELMANN**

Institut de Recherches Hydrauliques (IPH), Université Fédérale du Rio Grande do Sul, CP 530, 90001 Porto Alegre, Brésil

Résumé Malgré bien des insuffisances, les données recueillies par le réseau sédimentométrique brésilien permettent d'établir des bilans sédimentologiques rudimentaires, pouvant servir à détecter les bassins prédisposés aux problèmes d'érosion ou de sédimentation. Le calcul sommaire de la concentration moyenne et de la production spécifique minimum des sédiments en suspension fait à partir de ces données, permet d'identifier les régions où les problèmes de sédiments seront à prendre plus spécialement en compte dans les projets ou la gestion d'ouvrages hydrauliques.

Evaluation of the risks of erosion and sedimentation in Brazil from rough sediment budgets

Abstract Although insufficient in many ways, the data collected in the Brazilian sediment measurement network permit the calculation of rough sediment budgets which may help detect basins prone to erosion or sedimentation problems. Using these data, a simplified computation of mean concentration and of the minimum specific suspended production, permit the identification of regions where sediment problems require particular attention when designing or managing hydraulic structures.

INTRODUCTION

Au Brésil les problèmes posés par les sédiments sont l'objet de préoccupations relativement récentes. Jusqu'ici les grands aménagements hydroélectriques étaient les pièces maîtresses des systèmes de mise en valeur de l'eau: le volume des réservoirs, l'étendue des bassins de contribution expliquaient des taux d'alluvionnement qui n'avaient généralement rien d'inquiétant. Quant à la contamination par les sédiments elle était quasiment inexistante dans les années soixante, alors que débutaient les premières mesures systématiques de débit solide.

La situation a changé. La rareté croissante des sites propices à la construction de grands barrages, le coût de ceux-ci, la diversification des besoins en eau aussi bien que la décentralisation des décisions les concernant donnent de plus en plus la préférence à des ouvrages de moindre envergure

pour lesquels les risques de comblement sont plus élevés. Par ailleurs l'expansion et l'intensification de l'agriculture ainsi que les exigences de protection de l'environnement posent des contraintes supplémentaires en rapport avec les sédiments.

Or les données sédimentologiques nécessaires au dimensionnement et aux études d'impact de ces ouvrages font défaut. Les stations hydrométriques fournissant des données sédimentologiques en qualité et quantité suffisantes sont rares et deviennent quasiment introuvables pour les bassins de taille inférieure à 1000 km². Le réseau sédimentométrique est à revoir et à compléter. Des priorités sont à donner pour ce faire, en fonction des risques d'alluvionnement de retenues et de déséquilibre des cycles sédimentologiques.

Un premier diagnostic de régionalisation de ces risques a donc été tenté, pour lequel on a fait appel au concept de bilan sédimentologique.

APPROCHE DE L'EVALUATION DES RISQUES SEDIMENTOLOGIQUES

La stratégie initialement adoptée pour établir la régionalisation recherchée consiste à comparer trois types d'informations sur la production de sédiments:

- (a) débits solides totaux, mesurés aux stations hydrométriques;
- (b) taux d'érosion des interfluves, estimés indirectement par les valeurs des paramètres de l'équation universelle de perte de sols (USLE);
- (c) résultats du recensement des problèmes posés par les sédiments (comblement de retenues, coûts exagérés du traitement des eaux ou de l'entretien du réseau routier, fréquence des dragages des canaux et cours d'eau ...).

Cette troisième action était prévue, au départ, pour lever les doutes que devait susciter la comparaison des résultats des deux opérations antérieures.

Une première tentative (Bordas *et al.*, 1987) montra que la stratégie était valable bien qu'il faille pour la mettre en oeuvre simplifier à l'extrême les variables à considérer. Ainsi la concentration des suspensions fut le seul paramètre de débit solide à pouvoir être utilisé (au lieu du débit solide total) et l'érosion des interfluves ne put être que partiellement prise en compte faute de données suffisantes sur l'énergie du relief et la couverture du terrain. Malgré ces limitations le résultat s'avéra concluant: la coïncidence entre la distribution des concentrations et celle du potentiel d'érosion se révéla cohérente et si complète, que le recensement (c) servit plus à corroborer la similitude des résultats qu'à éclaircir les doutes que leur comparaison pouvait soulever.

Reconnu le bien-fondé de la méthode restait à la compléter, et à introduire les bilans sédimentologiques qui permettraient d'obtenir la distribution régionale des productions spécifiques des suspensions cherchée pour orienter le redéploiement du réseau sédimentométrique.

LE RESEAU SEDIMENTOMETRIQUE BRESILIEN

Les données recueillies permirent d'identifier 441 stations sédimentométriques, à charge d'une douzaine d'institutions différentes (IPH/UFRGS, 1986). Au

mois de septembre 1986, seules fonctionnaient 264 d'entre elles, pour la plupart sous responsabilité du Département National des Eaux et de l'Énergie (DNAEE, 1983).

Le Tableau 1 fournit les renseignements essentiels sur leur répartition géographique, leur fonctionnement et les données qui y sont collectées.

Tableau 1 Réseau sédimentométrique brésilien (septembre 1986)

| Région | | Nord | Est | Sud | Total | |
|-----------------------------|--|-------------------------------|-----|------|-------|-----|
| Structure | Nombre de stations recensées | 70 | 102 | 269 | 441 | |
| | Stations fonctionnant en 1986 | 54 | 62 | 148 | 264 | |
| | Stations de taille <1000 km ² | 0 | 3 | 38 | 41 | |
| | Densité (p/100000km ²) | 1,1 | 5,3 | 15,8 | 5,2 | |
| Types de données collectées | (unités: nb de points de collecte) | concentration de suspension | 61 | 91 | 201 | 353 |
| | | débit liquide | 46 | 85 | 161 | 292 |
| | | charriage | 17 | 1 | 19 | 37 |
| | | granulométrie du fond | 15 | 64 | 43 | 122 |
| | | granulométrie des suspensions | 43 | 82 | 14 | 139 |
| Fonctionnement | Fréq. des collectes | journalière | 0 | 21 | 49 | 70 |
| | | sporadique | 70 | 91 | 210 | 371 |
| | Durée d'opération des stations | 1 an | 7 | 2 | 17 | 26 |
| | | 1-4 ans | 16 | 27 | 59 | 102 |
| | | 5-8 ans | 25 | 33 | 89 | 147 |
| | | 9-12 ans | 19 | 25 | 77 | 121 |
| | | >12 ans | 0 | 16 | 11 | 27 |

Un bref examen de ces tableaux permet de pressentir les difficultés que posera le calcul de bilans sédimentologiques complets: rareté des données de charriage et de granulométrie, manque de systématisation des collectes, non-coïncidence des mesures

BILAN SEDIMENTOLOGIQUE RUDIMENTAIRE

S'entend par ce terme le calcul du poids moyen annuel de sédiments, produit ou stocké par unité de surface d'un bassin versant. En tête de bassin il est obtenu à partir du débit solide en suspension à chaque station d'amont; plus

à l'aval, par différence entre les entrées et sorties de matériau en suspension aux stations de contrôle. Cette définition tant évidente qu'élémentaire, est qualifiée de rudimentaire pour indiquer que le calcul est fait en partant des données brutes, telles que disponibles auprès des institutions d'origine, et, de plus, en simplifiant celui-ci comme indiqué ci-après:

- (a) La production annuelle est obtenue en sommant les productions mensuelles moyennes chaque fois que leur nombre est égal ou supérieur à cinq. Les stations qui ne disposent que de quatre mois de données ne sont pas prises en compte.
- (b) La production mensuelle est obtenue à partir de la concentration moyenne journalière et du débit liquide moyen mesuré qui lui est associé. Lorsque ce dernier n'est pas disponible, on prend le débit moyen journalier de la station.
- (c) La concentration moyenne journalière est la moyenne des concentrations obtenues par toutes les mesures sporadiques effectuées durant le mois en question, depuis l'entrée en opération de la station. Dans le cas de stations à relevés journaliers, on utilise les mesures isolées faites par l'équipe de contrôle.

Aucun tri de données n'est donc fait *a priori*. Le seul examen critique auquel il est procédé a lieu lorsque la valeur du bilan est anormale ou incohérente. On vérifie alors la compatibilité des données utilisées: nombre de données, crue à une seule station

VALIDITE DES BILANS RUDIMENTAIRES

La quantité des données disponibles, les simplifications introduites dans le calcul des bilans permettent de douter de la validité du concept de bilan sédimentologique rudimentaire et de son utilisation à une fin pratique. On peut néanmoins penser que la somme des insuffisances et des erreurs est identique en tout lieu et que les résultats finaux, aussi imparfaits soient-ils, doivent pour le moins permettre une étude comparative. S'il en va ainsi il doit être possible, à partir des valeurs des bilans sédimentologiques rudimentaires:

- d'identifier des zones dont les productions spécifiques sont semblables et qui doivent en partie correspondre aux zones antérieurement définies à partir des concentrations;
- de définir pour chacune de ces zones, des valeurs moyennes de la production spécifique compatibles entre elles, en accord avec les caractéristiques propres à chaque zone;
- d'expliquer, pour chaque zone, les écarts anormaux des débits solides spécifiques par rapport à la valeur moyenne propre de la région.

Ainsi la validité du concept doit pouvoir être — et a été — testée à partir de cinq critères au moins:

- (a) cohérence des distributions dans l'espace des débits solides spécifiques et des concentrations en suspension;
- (b) cohérence des valeurs moyennes des débits solides spécifiques caractérisant les différentes régions;

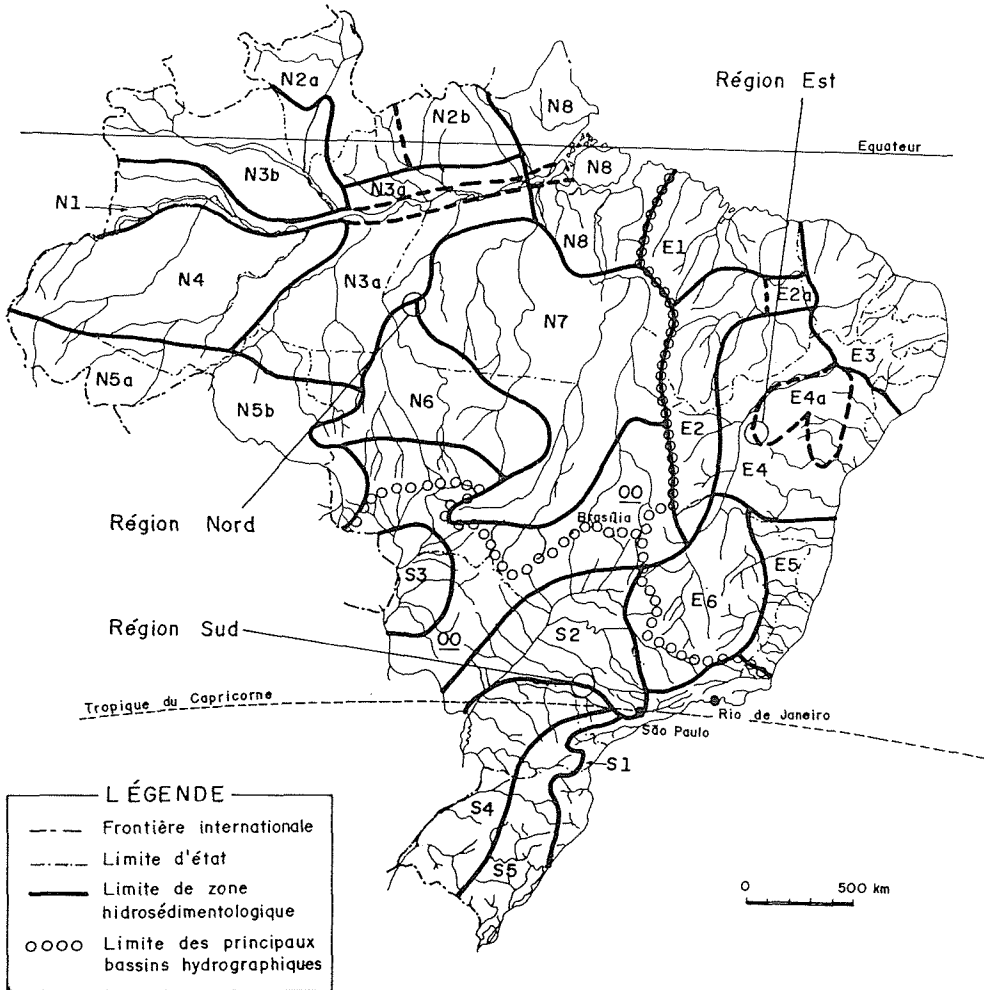


Fig. 1 Régionalisation de la prédisposition aux risques sédimentologiques au Brésil.

- (c) explication des valeurs de débits solides spécifiques anormalement élevées;
- (d) explication des valeurs négatives de débit solide spécifique (zone de dépôts);
- (e) cohérence des résultats pour des bassins-gigognes dans des régions de caractéristiques semblables.

RESULTATS

Une analyse systématique des 336 bilans qu'il fut possible de calculer, fut menée à partir des cinq critères précédents. Elle montra que le concept de

Tableau 2 Régionalisation sédimentologique préliminaire du Brésil

| Région | Zone | Code | Précipitations | | Caractéristique de surface prédominante | | | Concentration moyenne annuelle en suspension (mg/l) | Production spécifique (t/km ² /an) | |
|---|-----------------------|--------|-----------------------------|--|--|---------------------|---------------------|---|---|---|
| | | | Indice d'érosivité R (USLE) | Moyenne annuelle (mm) | Erodibilité du sol | Relief altitude (m) | Couverture végétale | | Moyenne des bassins | Moyenne des projections bassin de 15000 km ² |
| DORSALE occupant partie des 3 régions principales | | 00 | + 1000 | 1250/2000 | Moyenne | 200/800m | Cerrado (*) | 260 | 146 | 145 |
| NORD | Vallée de l'Amazone | N1 | x | x | x | x | x | 220 | Dépôts | x |
| | Roraima | N2a | > 1000 | 1500/2000 | Moyenne | 100/500m | Forêt/ Cerrado (*) | 65 | 50 | 50 |
| | Frontière des Guyanes | N2b | | | Moyenne/ Faible | | | 15 | 4,5 | 7,5 |
| | Amazonie centrale | N3a | >1000 | > 2000 et > 2500 dans la partie Ouest) | Faible | <100m | Forêt | 15 | 2,5 | 2 |
| | Rio Negro | N3b | | | Moyenne/Faible (Ravinés - ments possibles) | | | 15 | - | 23 |
| | Amazonie occidentale | N4 | > 1000 | > 2000 | Moyenne | < 200m | Forêt | 150 | 100 | ~160 |
| | Acre | N5a | > 1000 | > 2000 | Elevée/ Moyenne | 100/500m | Forêt | 500 | 250 | 350 |
| | Rondônia | N5b | | | Moyenne | 100/800m | Forêt/Cerrado | 170 | 455 | 245 |
| | Tapajós | N6 | > 1000 | 2000/2500 | Faible | 200/500m | Cerrado (*) | 20 | ~8 | ~10 |
| | Amazonie orientale | N7 | > 1000 | 1500/2000 | Moyenne/ Faible | 200/500m | Cerrado (*) | 65 | 65 | 50 |
| Littoral amazonien | N8 | > 1000 | > 2000 | Faible | < 100 m | Forêt | 27 | 16 | 17 | |

| | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|----------|-----------------------|---------------------|---|--------------------|-------------------------------|------------------|--------|----|
| EST | Littoral Nord | E1 | > 1000 | 1000/2500 | Moyenne | 200/500m | Savane | - | - | - |
| | Pré-Amazonienne | E2 | 500/1000 | 1000/1250 | Faible | 200/800m | Caatinga (**) | 82 | 10 | 15 |
| | | E2a | 750/1000 | 1000/1500 | Moyenne | 200/500m | | - | - | - |
| | Nord Est | E3 | 250/750 | Variable max 650 | Variable (de moyenne à élevée) | Variable | Caatinga (**) | 200 (110/500) | 30 | 82 |
| | Bahia | E4 | 500 | < 500 | Moyenne | 500/800m | Caatinga/ (**) Cerrado (*) | - | - | - |
| | | E4a | 250/500 | 500/1000 | Elevée | 0/800 | Caatinga (**) | - | - | - |
| | Littoral Est | E5 | 500/750 | 650/2000 | Faible/ Moyenne | Incliné 0/800 | Forêt/ Cultures | 220 | 43 | 66 |
| Minas Gerais | E6 | 500/1000 | Variable 1000/2000 | Elevée/ Moyenne | Accidenté 500/1200 | Cerrado (*) | 315 | 250 | 250 | |
| SUD | Littoral Sud | S1 | 750/1000 | 1250/2000 | Elevée/ Moyenne | Accidenté | Forêt | 100 | 155 | 55 |
| | São Paulo | S2 | 500/750 | 1000/1500 | Moyenne | Plan | Cultures | 165 | 45 | 45 |
| | Pantanal | S3 | 750/1000 | 1000/1250 | Moyenne/ Faible | Plan | Savane | 180 | Dépôts | - |
| | Sud Ouest | S4 | 750/1000 | 1250/2000 | Elevée/ Moyenne | Plateau incisé | Cultures | 100 | 95 | 50 |
| | Sud | S5 | 500/750 | 1000/2000 | Elevée à l'Est Moyenne à l'Ouest | Plateau escarpé | Prairies/ Forêt | 50 | 26 | 20 |

(*) CERRADO: Savane arborée ; (**) CAATINGA: Forêt basse épineuse.

bilan sédimentologique rudimentaire est valable et permet d'établir un premier zonage des risques sédimentologiques à partir de données de moindre qualité.

Critère no. 1 Il y a cohérence entre les distributions spatiales des débits solides spécifiques et des concentrations en suspension. En première approximation on peut reconnaître au Brésil 19 régions caractérisables par les valeurs moyennes de la concentration moyenne annuelle (CMA) de la suspension et du débit solide spécifique correspondant. Ces régions sont rapportées sur la Fig. 1 et leurs caractéristiques sont indiquées au Tableau 2. On notera que ce tableau indique deux valeurs du débit spécifique: la première est la moyenne des valeurs obtenues pour chaque bassin versant faisant partie de la région et a donc rapport à des bassins de tailles souvent très différentes. La seconde est la moyenne des valeurs rapportées à un bassin de référence de 15 000 km² à l'aide, faute de mieux, de la formule utilisée aux USA:

$$P_s = KA^{-0.24}$$

où

P_s production spécifique en t km⁻² an⁻¹;

A surface du bassin (en km²);

K coefficient caractéristique du bassin considéré.

Le bassin de 15 000 km² a été choisi comme référence du fait qu'il était le seul que l'on puisse rencontrer avec une même fréquence (20%) dans les trois grandes régions hydrographiques du pays (nord, est et sud).

Critère no. 2 Les différences entre les valeurs moyennes des débits en suspension sont explicables globalement par les caractéristiques des pluies ou de couverture des bassins. Ainsi par exemple les différences entre N6 et N7 sont explicables par les différences d'érodibilité des sols, entre N2 et N7 par l'effet de la couverture végétale, entre E3 et E5 par la couverture végétale et le relief A l'intérieur d'une même région on peut même distinguer des sous-régions, comme par exemple en S1 où les valeurs des productions diffèrent clairement selon l'état de déboisement des bassins (190 t km⁻² an⁻¹ contre 32), ou en N2b où la production varie d'un bassin à l'autre selon le type de sol qui prédomine.

Critère no. 3 79 cas de production spécifique en excès ont été recensés. Seuls 3 n'ont pu être expliqués à partir des informations disponibles. Les conditions naturelles d'érosion des interfluves suffisent généralement pour expliquer les écarts enregistrés par rapport aux moyennes, mais l'instabilité du lit du cours d'eau ou l'action de l'homme sont également des facteurs qui peuvent intervenir. C'est le cas par exemple pour les plus fortes valeurs de débit solide spécifique obtenues: 2006 t km² an⁻¹ pour un bassin de 5300 km² de la zone E5 et 1800 t km² an⁻¹ pour un bassin de 54 000 km² de N5b (Rondônia). Dans le premier cas, l'instabilité des rives et les fréquents glissements de terrain sont responsables; dans le second le

déboisement accéléré est à mettre en cause.

Critère no. 4 Des 45 cas de dépôts indiqués par les bilans rudimentaires, huit sont sans explication plausible à partir des informations disponibles. Il est remarquable que dans la plupart des bassins sièges de ces dépôts existent un barrage important ou plusieurs réservoirs de taille moyenne — bien souvent en voie de comblement ainsi qu'a permis d'établir le recensement des réservoirs et des problèmes de sédiments fait lors de la première tentative de régionalisation. Par ailleurs des zones de dépôt naturel (région du Pantanal par exemple) apparaissent clairement.

Critère no. 5 Seuls sept cas ont pu être détectés. Dans un seul seulement la production spécifique d'aval était supérieure à celle de la tête de bassin, bien que les conditions de surface et de précipitation laissent attendre le contraire.

CONCLUSION

La régionalisation des risques d'érosion et de sédimentation s'est avérée faisable, au Brésil, par l'emploi de bilans sédimentologiques simplifiés, établis à partir de données de qualité généralement médiocre. La précision avec laquelle elle est obtenue est suffisante pour orienter un éventuel redéploiement du réseau sédimentométrique et apprécier en première instance l'importance des risques et des impacts sédimentologiques d'un aménagement des eaux et/ou des sols.

Tableau 3 Prédiposition actuelle (1988) aux risques sédimentologiques au Brésil

| Classe | Taux d'érosion P_{ss} ($t\ km^{-2}\ an^{-1}$) | Régions* |
|--------|---|------------------|
| I | $P_{ss} > 300$ | N5a; N5b |
| II | $150 < P_{ss} < 300$ | E6 |
| III | $100 < P_{ss} < 150$ | 00; N4 |
| IV | $75 < P_{ss} < 100$ | S1; S4 |
| V | $50 < P_{ss} < 75$ | N2a; N7; E3; E5 |
| VI | $25 < P_{ss} < 50$ | S2; S5; N3b |
| VII | $5 < P_{ss} < 25$ | N2b; N6; N8; E2 |
| VIII | $0 < P_{ss} < 5$ | N3a |
| IX | Dépôts | NI; S3 |
| X | Sans classification faite de données | E1; E2a; E4; E4a |

P_{ss} Taux d'érosion (suspension seulement) pour des bassins entre 2500 et 30 000 km^2 (excepté pour la zone N4 où les surfaces des bassins avoisinent 100 000 km^2).

*Voir Fig. 1.

Ainsi les régions que ce travail a permis d'identifier peuvent être classées par leur degré de prédisposition aux risques sédimentologiques comme indiqué au Tableau 3.

Remerciements Si ce n'était l'appui donné par ELETROBRAS (Centrales Electriques Brésiliennes SA) aux études des problèmes sédimentologiques, le présent travail n'eut pas été possible. L'Université Fédérale du Rio Grande do Sul lui en est reconnaissante, ainsi qu'elle l'est aux institutions qui ont mis à disposition des chercheurs de l'Institut de Recherches Hydrauliques toutes les données, la plupart du temps inédites, dont elles disposaient.

REFERENCES

- Bordas, M. P., Lanna, A. E., Leprun, J. C. & Semmelmann, F. R. (1987) Diagnostic préliminaire des risques de sédimentation au Brésil (en portugais). *Comptes Rendus du VII Symposium Brésilien d'Hydrologie et Ressources en Eau* (Salvador, Brésil), vol. 3, 223-235.
- DNAEE (1983) *Inventaires des Stations Hydrométriques*.
- IPH/UFRGS (1986) Etude des conditions sédimentologiques des principaux cours d'eau brésiliens (en portugais). Rapport préliminaire, 3 volumes. Rapport technique UFRGS/ELETROBRAS.