Les Cahiers d'Outre-Mer

Revue de géographie de Bordeaux

223 | Juillet-Septembre 2003

Pression anthropique et environnement en Amérique latine

Risques naturels, actions anthropiques et enjeux à San Miguel de Tucuman (Nord-Ouest argentin)

Marie-Claire Prat et José Manuel Sayago

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/com/801>

DOI : 10.4000/com.801

ISSN : 1961-8603

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2003

Pagination : 301-326

ISSN : 0373-5834

Référence électronique

Marie-Claire Prat et José Manuel Sayago, « Risques naturels, actions anthropiques et enjeux à San Miguel de Tucuman (Nord-Ouest argentin) », *Les Cahiers d'Outre-Mer* [En ligne], 223 | Juillet-Septembre 2003, mis en ligne le 13 février 2008, consulté le 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/com/801> ; DOI : 10.4000/com.801

Ce document a été généré automatiquement le 19 avril 2019.

© Tous droits réservés

Risques naturels, actions anthropiques et enjeux à San Miguel de Tucuman (Nord-Ouest argentin)

Marie-Claire Prat et José Manuel Sayago

- 1 L'agglomération de San Miguel de Tucuman s'est développée au pied des cordons montagneux préandins, dans la vallée du rio Sali. La croissance démographique, soutenue depuis la fin du XIX^e siècle, s'est accélérée dans la seconde moitié du XX^e siècle, accompagnée d'un phénomène de métropolisation. La ville de San Miguel de Tucuman regroupe aujourd'hui plus de 500 000 habitants au cœur du Grand S.M. de Tucuman qui, avec 800 000 habitants au dernier recensement (2001), rassemble plus de 80 % de la population de la province homonyme et atteint le 5^{ème} rang dans la hiérarchie urbaine argentine.
- 2 La croissance urbaine s'est faite rapidement, sans plan d'ensemble, et notamment vers l'ouest en direction de la montagne, dans un milieu subtropical (26°27'S) fortement contrasté. Les dynamiques morpho-climatiques particulièrement actives et les nouvelles dynamiques socio-économiques se traduisent par des risques accrus pour l'homme et ses aménagements.
Une forte activité morpho-climatique, source de risques
- 3 La ville de Tucuman s'est installée dans la région de transition entre la plaine du Chaco occidental et les cordons préandins (fig. 1). Les milieux physiques, fortement contrastés entre la montagne et le piémont, favorisent une intense activité morphogénétique.
Une région de forts contrastes Contrastes topographiques
- 4 Le passage de la montagne à la plaine est rapide et se fait par l'intermédiaire de glacis et de cônes alluviaux, la limite montagne-glacis se trouvant aux alentours de 700 m. Un bloc de grès argileux rouges (Lomas de Imbaud) s'est trouvé isolé tectoniquement de la montagne au pied de laquelle se développent des glacis couverts dont la pente décroît vers l'est (8 à 2 %). Ils recoupent un matériel détritique alternant avec des dépôts de loess (fini-pléistocène et holocène) sur un substratum tertiaire ou crétacé (grès, argilites et conglomérats). Mais alors que le glacis supérieur a été largement érodé, le glacis principal

tranche le matériel meuble de la formation de Tucuman. Là s'est développée, à 435 m d'altitude, la ville capitale de la province.

- 5 A l'ouest, dominant la ville, la Sierra de San Javier appartient à l'ensemble des cordons préandins, et culmine à 1 876 m au Taficillo (fig. 4). La dissymétrie du relief est nette avec les pentes les plus fortes à l'est, parfois supérieures à 100%, le contact avec le piémont se faisant par failles. Le soubassement métamorphique affleure au cœur de la sierra avec des intrusions granitiques. Les ríos se sont encaissés dans ce substratum cristallin en liaison avec le soulèvement de la montagne. Ils coulent au fond de vallées en V, étroites. Mais au débouché sur le piémont les vallées s'élargissent, avec un profil en U taillé dans les limons, les sables grossiers et les graviers.

Contrastes climatiques et hydrologiques

- 6 Les contrastes saisonniers sont importants. La plaine et le piémont connaissent des conditions tropicales en été avec une forte chaleur (plus de 30° C) et plus de la moitié des précipitations tombant de décembre à mars. Les pluies de convection dominent alors mais certaines précipitations combinent effet de front et processus convectifs. Les pluies, de forte intensité (jusqu'à 80 mm/h), tombent sur une surface limitée et sont parfois accompagnées de grêle. Au contraire, les printemps sont chauds et secs et les hivers tempérés (moyenne de 12°C pour le mois le plus froid) mais avec des brouillards fréquents.
- 7 Au total, la région de San Miguel de Tucuman reçoit 943 mm de précipitations en moyenne, mais les versants orientaux des sierras qui dominent la plaine reçoivent plus de 1500 mm (effet orographique). L'exposition est un facteur important car les vents porteurs d'humidité viennent de l'est (flux venant de l'Atlantique) mais des fronts froids circulent également en hiver du Sud vers le Nord. Les versants tournés vers l'est et le sud reçoivent donc les précipitations les plus abondantes, d'autant que ce sont les premiers reliefs rencontrés par les masses d'air humide. L'orientation de la vallée du Rio Muerto, ouverte vers le sud-est, favorise la pénétration des vents humides.
- 8 Si l'essentiel des pluies tombe en été, les versants des montagnes, notamment à l'étage forestier, sont souvent dans les nuages qui accompagnent les fronts froids en hiver. Les mesures réalisées dans le cadre du projet PROCUT (projet d'étude du climat urbain de Tucuman), avec pluviomètres mais aussi pièges à brumes et brouillards, montrent que les forêts de montagne de Tucuman appartiennent à la forêt des nuages subtropicale (Hunzinger, 2000). Si à 720 m, la nébulosité n'atteint jamais la quantité de pluie mensuelle, à 1 350 m, le volume d'eau apporté par les brouillards dépasse pendant 5 mois la quantité de pluie (avril, mai, juin, juillet et septembre) et lui est égal en août.
- 9 Les contrastes climatiques saisonniers expliquent le fonctionnement irrégulier des cours d'eau. En été, lors des précipitations intenses, les crues peuvent être soudaines et violentes. Au contraire, en hiver les écoulements sont réduits. Le lit majeur du Rio Muerto est fréquemment asséché.

Une intense activité morphodynamique

- 10 Erosion hydrique et mouvements de masse sont particulièrement visibles dans la montagne, tandis que les flux torrentiels et inondations affectent à la fois les vallées montagnardes, le piémont et la plaine entraînant des risques pour l'homme et ses aménagements (fig. 4 et 5).

L'érosion hydrique

- 11 Des ravinements peuvent se former sur le piémont au niveau des collines de grès argileux rouges ou sur les glacis dans la zone cultivée. Sur ces derniers, ils sont toutefois peu fréquents en raison des faibles pentes et n'atteignent que rarement plusieurs mètres, le plus souvent sur les bordures des grandes routes qui facilitent le ruissellement des eaux de pluie.
- 12 Les ravinements existent aussi dans la zone des sommets de la Sierra San Javier (fig. 5). Vers 1 500-1 700 m d'altitude, sur les marges des surfaces mûres, planes ou doucement ondulées à couverture limono-argileuse, ils se développent à la tête des arroyos les plus importants ou un peu plus haut. De 1 à 2 m de large, avec des ramifications, ils se forment sur du matériel loessique, par recul des têtes de source. Mais l'amorce de ces formes de ravinement se fait souvent au niveau de formes de suffosion, fréquentes dans les loess. Sur ces hautes surfaces le phénomène démarre à partir d'une petite cuvette ou d'un entonnoir lié à l'entraînement des matériaux les plus fins en profondeur.

Les mouvements de terrain

- 13 Les risques de mouvements de masse les plus importants concernent la Sierra San Javier. En été, l'activité morphodynamique est notable : reptation, glissements, coulées. La fourniture de matériel peut provenir de l'altération sur fractures des roches métamorphiques formant le substratum : schistes, phyllites. Les lignes de fractures parallèles (NW-SE et E-W), bien visibles sur les photographies aériennes, peuvent ainsi constituer des zones de fragilité où se préparent les glissements.
- 14 Une mince couche de loess et de matériaux clastiques recouvre la roche en place. Pendant les étés humides, ce matériel en partie argileux se gorge d'eau et devient instable. La couverture forestière, pourtant importante sur les versants exposés aux flux humides du sud et de l'est, ne suffit pas à assurer la stabilité des colluvions sur des pentes fortes car à faible profondeur le substratum métamorphique avec ses plans de schistosité fait effet de « couche savon ». Même sous forêt, on observe donc des glissements de toute taille.
- 15 Des phénomènes de glissements régressifs se produisent à l'amont des petits affluents du Rio Muerto. Les couronnes de départ des glissements sont bien visibles (fig. 5). Or, c'est la zone de naissance de tout le système fluvial qui aboutit sur le piémont. D'autre part, à l'aval, les mouvements de masse sont entretenus par l'érosion latérale des cours d'eau qui maintient ainsi l'appel au vide à la base des versants.
- 16 Cette dynamique active sur les versants se manifeste par le grand nombre de glissements et par la courbure des arbres liée à la reptation. Le revêtement de la route qui monte au Cerro San Javier porte ainsi les traces de ces mouvements : ondulations, fissures semi-circulaires qui annoncent les tassements et les départs de glissements à partir de cicatrices d'arrachement en couronnes. La route doit sans cesse être réparée car les éboulements et glissements provoquent dégâts et interruption de trafic (photo 1). Le matériel glissé et les arbres arrachés parviennent en partie jusqu'aux talwegs, où ils sont repris lors des crues suivantes et transportés vers l'aval, formant des barrages naturels. Ces embâcles finissent par céder et le matériel est entraîné vers l'extérieur de la montagne.
- 17 Par contre, les mouvements de terrain sont limités sur le piémont où les pentes sont faibles. On observe seulement une érosion latérale sur les bords des rios, par sapement des berges lors des crues avec de petits éboulements.

Les crues et les inondations

- 18 Les coefficients de torrentialité élevés sont liés aux pentes fortes et à l'intensité des précipitations. Ils expliquent que les pics de crue soient atteints en un temps minimum. Les crues torrentielles estivales, se produisant généralement entre janvier et mars, peuvent être violentes et transforment les lits asséchés le reste de l'année en torrents dont le débit et la charge transportée augmentent vers l'aval.
- 19 L'érosion est forte à l'amont de ces cours d'eau, mais à l'aval la charge très élevée de ces écoulements torrentiels favorise l'érosion latérale aux dépens de l'érosion verticale. Transportés sur des distances variables selon leur taille, les matériaux sont ensuite abandonnés dès que la compétence faiblit avec la diminution de la pente. Ils forment un épais pavage au fond des lits des rios.
- 20 Dans les vallées intramontagnardes, le caractère torrentiel des écoulements provoque des destructions et des inondations. A plusieurs reprises, dans le bassin du Rio Muerto, des prises d'eau potable destinées à l'approvisionnement de la ville ont été détruites. Dans la vallée, une crue a emporté pendant l'été 2001 une *confiteria* (salon de thé). La puissance destructrice de ces crues torrentielles vient non seulement du débit liquide mais aussi de la charge solide (photo 2). Ce sont les mouvements de terrain qui apportent la plus grande quantité de sédiments aux rios, mais l'érosion latérale, par divagations des chenaux, joue également un rôle.
- 21 Sur le piémont, le risque inondation n'est pas seulement lié à l'augmentation des débits dans les lits actuels suivie de débordements. La présence de paléo-cours rappelle une dynamique torrentielle plus active lors de périodes plus humides au cours du Quaternaire. Ces zones déprimées sont soumises aux risques d'inondation car, en cas de crue, l'écoulement des eaux retrouve naturellement les anciens chenaux. D'autre part, la forte diminution de la pente à la sortie de la montagne explique l'abondance de l'alluvionnement, l'exhaussement des lits et donc l'aggravation des inondations qui menacent les zones peuplées (fig. 5).
- 22 Dans la plaine, le risque est non seulement lié aux crues saisonnières des torrents venus de la montagne et aux débordements du Rio Sali, mais aussi à l'élévation de la nappe phréatique dans les zones planes ou déprimées. Les sols peuvent ainsi rester saturés pendant de longues périodes.
- 23 A la périphérie de la ville de San Miguel de Tucuman, des canaux ont été construits dans les années 1950 pour évacuer les eaux venant de la montagne, mais ils sont régulièrement menacés par l'érosion et les accumulations. Ainsi, le canal recevant les eaux de la Sierra de San Javier a-t-il été détérioré lors des dernières crues. Les eaux, tourbillonnant, ont sapé les bordures en ciment qui se sont écroulées. Plus en aval, pour éviter le comblement du canal par les masses d'alluvions, il faut recréer le canal et accumuler le matériel sur les bordures formant ainsi des terrasses artificielles qui sont vite devenues des dépotoirs pour les ordures.
- 24 Le canal récupérant les eaux du Rio Muerto a également souffert. (photo 3). Lors d'une crue particulièrement violente, le canal fut incapable d'écouler le débit de crue et les bordures cimentées ont sauté sous la pression des eaux qui ont débordé largement. Vers l'aval, le pont sur le canal constituait un obstacle, il a été fortement détérioré. Les maisons imprudemment installées près du cours d'eau sont menacées. Les jardins encombrés de dépôts d'alluvions et de troncs d'arbres abandonnés par la crue, témoignent de sa violence. Certains propriétaires ont depuis construit un mur pour se

protéger, mais ils sont à la merci de la prochaine crue contre laquelle un simple mur apparaît bien dérisoire.

- 25 L'apport accru de sédiments vers les lits fluviaux, la multiplication des mouvements de terrain et des crues torrentielles sont donc à l'origine de dégâts croissants depuis les années 1970. Ils posent le problème de la responsabilité de l'homme dans cette aggravation. En même temps la croissance de l'agglomération de Tucuman expose davantage d'habitants et de constructions aux aléas naturels.

L'aggravation des risques et les enjeux

- 26 Les aléas correspondant aux mouvements de terrain et aux crues font partie de l'activité morpho-climatique normale dans ce milieu subtropical humide, mais les risques se sont accrus depuis les années 1970.

La part des facteurs naturels et le rôle des activités anthropiques

- 27 Si les contrastes climatiques saisonniers expliquent les fortes variations du régime des cours d'eau entre l'été et l'hiver, les totaux pluviométriques annuels plus élevés depuis 30 ans peuvent expliquer les modifications de la dynamique hydrologique. Mais il faut y ajouter les effets des activités anthropiques.

Une pulsation plus humide

- 28 A San Miguel de Tucuman, si la moyenne annuelle des précipitations est de 943 mm, le total pluviométrique depuis 1935 a varié entre 382 mm (en 1937) et 1 662 mm (en 1977). Mais alors que de 1935 à 1970, sur 36 années, 7 années seulement atteignent ou dépassent 1 000 mm, de 1971 à 2001, sur 31 ans, 24 années ont connu des précipitations supérieures à 1 000 mm.(fig. 6)

- 29 Cette période plus humide s'est traduite par une augmentation de la torrentialité. Aujourd'hui le toponyme de Rio Muerto (mort), ne convient plus pour un organisme à régime torrentiel connaissant des crues violentes avec un fort débit.

- 30 Les preuves en sont données par le service d'eau potable de Tucuman qui mesure le débit de 7 rios descendant de la Sierra de San Javier. Cet organisme existe depuis 1898. Pendant les premières décennies de mesures, le débit atteignait 10 jours par an 200 l/s et se réduisait à 50 l/s en hiver. A partir des années 1940, les débits de 200 l/s n'étaient plus enregistrés que 3 ou 4 fois par an et le débit se réduisait à 30 l/s en période de grande sécheresse. Jusqu'en 1974 le débit moyen s'est abaissé à 40 l/s. Puis on observe le retour d'un cycle plus humide avec des débits qui peuvent atteindre 850 l/s. L'été 2001 a été particulièrement humide et propice aux crues et inondations. L'augmentation des précipitations peut également entraîner une augmentation des processus érosifs et des mouvements de masse.

- 31 Il en découle une modification des caractéristiques morphodynamiques des organismes fluviaux, nette depuis une trentaine d'années avec la transformation des profils longitudinaux et transversaux. S'il y a augmentation de la charge alluviale, le système fluvial passe à un style tressé. La profondeur diminue et le lit s'élargit. L'érosion latérale est importante lors des crues d'où la réactivation des mouvements de masse sur les versants par appel au vide à la base des versants et l'apport de matériel supplémentaire dans le lit fluvial.

- 32 L'alluvionnement et l'exhaussement des lits sur le piémont et dans la plaine s'accompagnent d'une diminution de la capacité d'écoulement, d'inondations voire de changements de cours, tandis qu'une sédimentation accrue menace les barrages et les canaux d'où les risques accrus de débordements (Sayago et Toledo, 1995). Parallèlement,

l'élévation du niveau de base local provoque une modification du profil d'équilibre des rivières qui s'y terminent. En même temps on observe une élévation de la nappe phréatique qui peut conduire à l'inondation des zones topographiquement déprimées.

- 33 Les effets de cette pulsation climatique (cycle plus humide) sont d'autant plus importants qu'ils se produisent sur un milieu fragilisé par les actions anthropiques.
Certaines actions anthropiques peuvent fragiliser le milieu Les modifications de la végétation sont indéniables
- 34 Le recul de la forêt remonte à l'époque de la colonisation espagnole mais s'est surtout intensifié depuis le XIX^e siècle avec le développement de l'agriculture et de l'élevage. Le piémont au dessous de 600 m d'altitude, anciennement couvert de forêts, est aujourd'hui intensément cultivé. Pratiquement libre de gelées, la zone convient bien aux plantes subtropicales et la région de Tucuman est devenue le « jardin de la République argentine ».
- 35 Sur les versants orientaux des montagnes, où les précipitations sont élevées et l'humidité relative importante, se développe une végétation forestière exubérante, pérenne jusqu'à 1500 m d'altitude, les « Yungas ». C'est une forêt riche et diverse et sous le couvert arboré atteignant 15 à 25 m de hauteur poussent à profusion des épiphytes, lianes, plantes grimpantes, herbes, arbustes, fougères et champignons. La structure verticale complexe permet d'intercepter les précipitations directes mais aussi diffuses (« forêt des nuages »). Toutes les strates de la forêt participent à la captation des gouttelettes d'eau. Cette zone forestière des Yungas joue un rôle fondamental dans l'équilibre hydrologique du bassin versant du Rio Sali. Mais elle est menacée par les expansions agricole et urbaine. Pourtant c'est dans cette zone forestière que se situent les points de captage de l'eau potable indispensable à l'agglomération de Tucuman.
- 36 Dans la montagne, à partir des années 1930, a commencé au dessus de 600 m une intense exploitation de la forêt, sélective, entraînant le remplacement de la forêt naturelle par une forêt secondaire. La composition floristique de la forêt s'est modifiée avec l'étagé des « lauriers » (*Phoebe porphyria*), entre 600 et 1 000 m, auquel succède vers le haut la forêt de Myrtacées avec l'« arrayan » (*Myrcianthes uniflora*) et le « horco molle » (*Blepharocalix gigantea*). Beaucoup d'espèces ont disparu.
- 37 A l'étagé supérieur de la forêt de montagne domine l'« aliso » (*Alnus acuminata*). Cette aulnaie existe au-dessus de 1 700 m, surtout sur les versants humides où elle forme des communautés monospécifiques. On trouve également quelques pins (*Podocarpus parlatorei*) sous forme de quelques groupes d'individus dispersés dans les deux autres types de forêts. Pérennes, ils assurent une bonne protection du sol mais les dégradations par les troupeaux perturbent la régénération. La forêt de quenoas (*Polylepis australis*) forme seulement de petits bosquets sur les versants humides à la limite supérieure de la forêt, mais elle est affectée par le pâturage, le feu et le prélèvement de bois.
- 38 Sur les hautes surfaces de la Sierra de San Javier, à moins de 2 000 m d'altitude, la végétation a été largement modifiée par l'homme qui a détruit la forêt subtropicale pour développer des prairies d'élevage ou des cultures mais aussi le tourisme et certaines pratiques sportives (fig. 4). Une forte érosion laminaire se produit lorsque le surpâturage a détérioré la couverture végétale. Les sols déstructurés perdent leur capacité d'absorption et la pratique du brûlis peut avoir des effets pervers, détruisant la matière organique et les micro-organismes du sol. Celui-ci se trouve alors particulièrement sensible à l'action de la pluie.

Les modifications culturelles

- 39 En montagne, la population rurale peu nombreuse a développé une agriculture de subsistance qui a éliminé les pâturages d'altitude. Les agriculteurs travaillent de petites parcelles souvent sur des pentes fortes et jusqu'à l'épuisement des sols. Puis ils les abandonnent et travaillent les parcelles proches, ceci depuis des générations. La récolte intervient avant ou au début des pluies (novembre, décembre) laissant un sol sans protection ce qui favorise l'érosion hydrique. Dès que la végétation disparaît, les sols déjà peu développés sont soumis au splash, à l'érosion laminaire et aux ravinements. En bordure de ces zones dégradées se développent les processus morphogénétiques préparant les glissements (fig. 5).
- 40 Sur le piémont, la culture de la canne à sucre dominait jusqu'aux années 1960, et toute l'économie de la province de Tucuman était exclusivement basée sur l'activité sucrière. Mais la culture de la canne à sucre comme les sucreries avaient gardé un caractère traditionnel sans s'adapter aux nouvelles exigences du marché. Cet archaïsme, la surproduction, la concurrence du Brésil expliquent les crises successives qui entraînèrent la fermeture de 11 usines de la province dans les années 1960-70. La reconversion de la plaine s'est faite par l'extension de la citriculture et les conditions de ruissellement et d'érosion en ont été modifiées car si les champs de canne à sucre assurent une bonne couverture du sol jusqu'à la récolte, les alignements de citronniers, plantés dans le sens de la pente, laissent entre eux de larges bandes de sol à nu et ce pendant toute l'année.
- 41 Un programme mené sur des parcelles expérimentales (Hunziger, 2000) a permis de comparer les valeurs de ruissellement et d'érosion sur des parcelles où l'usage du sol est différent (forêt, canne à sucre et citronniers). L'érosion est 10 fois plus importante sous les citronniers que dans la plantation de canne à sucre qui assure une meilleure couverture végétale. Elle est 5 fois plus forte dans la plantation de canne que sous forêt et 70 fois plus élevée sous les citronniers que sous forêt. Le développement de la citriculture, important depuis les années 1970, accroît donc le ruissellement et par conséquent les risques d'inondation dans la zone du piémont.
- 42 La fragilité des sols dépend de la granulométrie, de la perméabilité, mais aussi de la teneur en matière organique. Or les textures fines, limoneuses, sont fréquentes (sols sur matériel loessique) et la teneur en matière organique peut être fortement diminuée par l'agriculture intensive. L'emploi d'engrais et d'herbicides a favorisé la déstructuration des sols tandis que l'érosion s'intensifie. L'usage intensif d'herbicides diminue en effet la couverture végétale et le passage des machines entraîne la formation d'un horizon compact en surface (« semelle de labour ») qui favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration.
- 43 L'érosion éolienne existe également chaque fois que le sol n'est pas protégé par la végétation, d'autant plus que peu de parcelles sont protégées par des brise-vent. Sur le piémont ou les hautes surfaces, la préparation des terres qui restent à nu pendant la saison sèche permet l'érosion éolienne. La granulométrie limoneuse des sols loessiques les rend alors très sensibles à la déflation surtout dans les zones de faibles pentes.
- Les effets de certaines infrastructures (fig. 4 et 5)
- 44 Partout les mouvements de terrain se sont amplifiés avec les actions anthropiques qui provoquent des déséquilibres sur les versants (constructions de routes, funiculaire). Certes, les sols peu développés et les pentes fortes auxquels s'ajoutent parfois des déboisements clandestins, peuvent expliquer le déclenchement des processus, mais les

routes ont également des effets en concentrant le ruissellement. Le passage des véhicules peut aussi constituer un élément déclencheur par les vibrations.

- 45 Or la Sierra de San Javier a fait l'objet dès 1948 d'un ambitieux projet de développement sous forme d'une cité universitaire qui aurait constitué un satellite de la ville de Tucuman. Dans une Argentine alors prospère, les premières constructions sont amorcées sur les hautes surfaces de la Sierra tandis que la construction d'un funiculaire ouvre une tranchée dans la forêt de montagne. Puis les difficultés économiques et politiques entraînent l'abandon du projet. Il en reste aujourd'hui quelques constructions inachevées et la trace des installations ébauchées pour la ligne de transport, autour de laquelle il avait fallu déboiser. La circulation de l'eau sur les versants a donc été modifiée.
- 46 D'autre part, depuis les années 1970, le développement du tourisme vers le Cerro San Javier est important. En effet, cette zone possède une incontestable valeur paysagère et des avantages climatiques. Comparée aux records de températures de la plaine, la fraîcheur en été y est agréable, en raison de l'altitude, mais aussi de l'ombrage sur les versants couverts par la forêt des Yungas. L'air pur et l'absence de pollution sont également appréciables à faible distance de la capitale provinciale, San Miguel de Tucuman. Celle-ci est couverte presque en permanence d'un voile de pollution et l'air y est parfois irrespirable lorsque le thermomètre atteint les 30 à 40°C, mais aussi en cas de situation anticyclonique hivernale, bloquant la pollution près du sol.
- 47 La Sierra de San Javier représente donc une aire d'attraction touristique, en été, mais aussi en hiver. Les températures du nord-ouest argentin sont en effet plus clémentes que dans la province de Buenos Aires ou dans le sud du pays. Ce sont 15 000 à 20 000 personnes qui viennent chaque mois à Tucuman de septembre à juin et jusqu'à 100 000 en juillet (petites vacances d'hiver). Le circuit de San Javier constitue une excursion incontournable et figure toujours en tête de la demande touristique. Or, le milieu est fragile et cette fréquentation n'est pas contrôlée.
- 48 La route vers le Cerro San Javier a été élargie pour permettre un flux accru de véhicules. Mais les travaux ont modifié la circulation de l'eau sur les versants notamment les rapports infiltration-ruissellement. Le drainage n'est pas aussi bien assuré qu'avant l'élargissement de la chaussée. Les eaux de pluie ruissellent et se concentrent sur la route puis s'infiltrant en bordure de la chaussée, venant augmenter la pression interstitielle dans le matériel de versant peu épais et à composante argileuse. Les glissements se multiplient, d'autant plus facilement que très souvent les plans de schistosité des roches du substratum à faible profondeur servent de plans de glissement. La végétation n'est pas capable de retenir les formations superficielles et ces mouvements de masse sur les versants entraînent des dégâts répétés sur les infrastructures. Des travaux sont en cours pour édifier des murs de soutènement mais les anciens ont été inutiles car leur base n'est pas profonde et ils sont entraînés par ces mouvements de terrain translationnels.
- 49 Certaines infrastructures hydrauliques ont eu également des effets pervers. Sur le piémont, des interventions anthropiques (barrières, murs de retenue, dérivations, canaux) peuvent aussi expliquer l'abandon des anciens lits ou au contraire la déviation et la concentration des eaux dans certains chenaux où l'érosion verticale s'accroît de façon spectaculaire entraînant quelques maisons et faisant des victimes (photo 4). Les canaux d'évacuation des eaux venant de la montagne ont été construits dans une période plus sèche. Ils sont aujourd'hui sous-dimensionnés pour les débits de crues actuelles ce qui aggrave les dégâts.

Les extractions de granulats

- 50 Elles sont pratiquées dans la vallée du rio Sali et dans les vallées qui descendent de la Sierra de San Javier (fig. 4). Les conséquences à moyen terme peuvent être particulièrement dommageables.
- 51 En effet, l'exploitation se fait parfois dans les lits mineurs des cours d'eau provoquant une érosion régressive (vers l'amont) mais aussi progressive (vers l'aval) à partir de la fosse d'extraction. Dans le bassin versant du Rio Muerto, parallèlement à la route 338, le lit du cours d'eau El Parque est exploité sur une longueur de 300 m de long et sur 1,5 m de profondeur, activant un processus d'érosion régressive en amont de l'exploitation, comme pour le Rio Muerto. Le matériel exploité contient non seulement des éléments de roche métamorphique mais aussi une composante limoneuse et argileuse qui favorise, avec le passage des machines, la formation d'un horizon compact au fond du lit. L'écoulement vers l'aval des pics de crue se trouve facilité. En même temps, on observe une déstabilisation des berges liée à l'augmentation de la puissance érosive latérale. On retrouve ces phénomènes sur les bords des Arroyos Curcuncho et Yacuanco. L'approfondissement du lit a entraîné l'effondrement de ponts ou la destruction de certaines prises d'eau destinées à alimenter la ville de Tucuman.
- 52 Dans la vallée du Rio Sali, les extractions de granulats en lit mineur ont aggravé le problème d'enfoncement du lit lié à des aménagements inconsidérés. Des remblaiements latéraux étaient destinés à limiter l'emprise du lit mineur tout en gagnant de l'espace grâce à ces terrasses artificielles. Mais l'augmentation de l'érosion verticale a entraîné l'effondrement du pont Lucas Cordoba.
- 53 Les gravières installées dans le lit majeur trop près du cours du Rio Sali constituent également autant de risques de détournement des eaux de crue lorsque le débit pleins bords est dépassé. Des plaintes sont régulièrement enregistrées de la part des habitants victimes de ces inondations.

Les impacts négatifs des véhicules tout terrain

- 54 Le développement de cette activité a des conséquences sociales, économiques, touristiques (Sayago *et al.*, 1999) mais implique des effets négatifs, géomorphologiques, édaphiques, biogéographiques.
- 55 Les véhicules tout terrain ont surtout des impacts sur le sol et la végétation qui est détruite ou endommagée par le passage des roues. Or, leur nombre a fortement augmenté ces dernières années, le prix relativement modeste des modèles bas de gamme facilitant l'accès des jeunes à cette pratique. Les zones concernées dépendent de l'accessibilité mais la pratique de la moto tout terrain n'est pas limitée par les pentes, ni même par la végétation. Les dégâts dépendent du poids du véhicule. Ils sont particulièrement graves sur le piémont et en montagne. La moto enduro puis les véhicules 4X4 arrivent en tête dans la hiérarchie des dommages potentiels, les cycles à 4 roues et les bicyclettes tout terrain venant ensuite.

L'expansion urbaine et l'installation dans des zones à risques

- 56 La crise de la canne à sucre et de l'industrie sucrière dans la province de Tucuman se sont accompagnées d'une redistribution de la population par migration vers la capitale San Miguel de Tucuman et les localités voisines accentuant le phénomène de métropolisation. Le développement de l'espace urbanisé a été rapide depuis les années 1970, et la superficie de l'agglomération a presque doublé en 32 ans (fig.4).

- 57 La croissance urbaine se fait de manière spontanée. Des lotissements s'installent dans les aires proches de la ville, sans équipement. Il peut s'agir d'acquisitions légales ou d'installations sauvages. Progressivement, ces nouveaux quartiers sont incorporés au tissu urbain et équipés en services de base, mais avec beaucoup de retard. La politique publique de production d'espace urbain reste limitée à quelques cas particuliers.
- 58 Jusqu'en 1990, les terrains de la périphérie nord et ouest étaient réservés par la spéculation immobilière (Mansilla et Soria, 2000). Lorsqu'ils ont pris suffisamment de valeur, ils ont été libérés pour la construction. A l'extrême ouest, près de la Sierra de San Javier, les conditions climatiques plus favorables et la voie d'accès rapide favorisent l'urbanisation autour de la route 338. L'installation des classes aisées se fait donc vers l'ouest en direction de la montagne. La commune de Yerba Buena, ville-jardin qui s'étire autour d'un axe est-ouest, a ainsi connu la plus forte croissance démographique de toute la province.
- 59 Au nord-ouest, l'urbanisation la plus récente est en partie planifiée mais le développement se fait aussi spontanément en liaison avec l'ouverture d'une avenue unissant le nord-ouest de la capitale à Horco Molle (au nord-ouest de Yerba Buena). L'expansion historique des classes aisées vers l'ouest, le long de l'avenue Mate de Luna, se double donc d'un nouvel axe parallèle (A^{da} Peron) avec la construction de quartiers réservés pour une population à haut niveau de vie (fig. 4). Dans ce contexte de croissance urbaine rapide, la construction d'un grand nombre d'habitations a été autorisée dans des zones à risque d'inondation. Cette situation témoigne de la toute puissance des sociétés immobilières capables d'imposer leur volonté à la puissance publique en négligeant les risques. Pourtant l'indication de la présence de paléocours sur le glacis se lit clairement dans le profil des axes de circulation nord-sud, dont les ondulations matérialisent la topographie. L'imperméabilisation liée à l'urbanisation augmente le ruissellement. Les zones en creux sont inondées chaque été et les habitants des maisons les plus récentes ont dû entreprendre des travaux pour évacuer le surplus d'eau. Les inondations peuvent aussi s'expliquer dans la plaine par une nappe phréatique élevée, et la présence de nombreux puits perdus aggrave le problème.
- 60 bordures des terrasses artificielles du fleuve où se sont multipliées les cités d'urgence (« *villas miserias* »¹). D'autre part, la présence de décharges à proximité du fleuve ajoute le risque de reprise des déchets emportés vers les zones habitées (fig. 7). Les risques de pollution et les menaces pour la santé publique s'accroissent d'autant plus en période de crue que l'usine devant traiter les déchets hospitaliers n'a pas une capacité suffisante et une partie de ceux-ci est mélangée aux ordures ménagères...
- Les aménagements de bassins versants Des méthodes éprouvées par ailleurs
- 61 Certaines mesures ont fait leurs preuves dans d'autres pays, parmi lesquelles l'amélioration de la couverture végétale, un meilleur drainage de l'eau sur les versants, et un traitement des lits des torrents afin de diminuer l'énergie et de piéger une partie de la charge alluviale.
- 62 La forêt et les sols forestiers peuvent diminuer l'impact des pluies intenses. L'interception par la végétation et la rétention par les sols peuvent atteindre les 2/3 de l'eau précipitée. Ceci a été confirmé par les mesures d'Hunzinger (2000) montrant des coefficients d'écoulement dans les petits bassins versants forestiers de 23 à 38 % alors qu'ils sont de 70 à 91 % dans les zones plantées en citronniers. La présence de la forêt amortit également les différences saisonnières dans l'écoulement et permet de préserver une ressource en

eau indispensable au piémont. Les espèces autochtones, adaptées au climat et aux sols mais aussi aux pentes fortes en milieu montagnard, doivent être privilégiées. L'aulne (*Alnus acuminata*), avec une croissance rapide et des racines qui fixent l'azote de l'air, est une espèce pionnière qui possède une grande capacité de colonisation. Son intérêt est grand pour la reconquête des zones dégradées par le brûlis, le surpâturage ou l'érosion dans la partie amont des bassins versants. De même, la conservation ou la récupération de la forêt de quenoas est importante pour l'équilibre écologique de tout le bassin.

63 Depuis 1994, existe un groupe d'horticulteurs à Alto Verde (Groupement San Isidro) qui participe à une recherche sur la reforestation, sur les espèces permettant d'améliorer les sols et la fixation des berges. Dans la partie moyenne des bassins versants, la protection des berges par des espèces arborées et arbustives peut en effet permettre de contrôler l'érosion latérale et donc l'alluvionnement en aval. Sur les berges d'un affluent du Rio Muerto, les bambous se sont révélés localement efficaces.

64 L'amélioration du drainage est indispensable pour lutter contre les mouvements de masse largement responsables de la forte charge alluviale des torrents. Les drains souterrains, la construction de collecteurs sont indispensables là où les chemins et les routes ont modifié la circulation de l'eau notamment sur la route de San Javier.

65 Des petits barrages de rétention des sédiments peuvent être construits au fond du lit avec des matériaux locaux, des pierres de différentes forme et taille qui peuvent venir prendre appui sur des arbres tombés en travers du cours d'eau (Sayago et Puchulu). L'écartement de ces barrages de même que leur hauteur doivent être soigneusement calculés en fonction de la pente, de la vitesse d'alluvionnement, la hauteur du barrage croissant de l'amont vers l'aval (de 0,90 m à 1,50 m).

Le bilan actuel des aménagements

66 Les mesures de reforestation restent insuffisantes. Elles devraient d'abord concerner les parties amont des bassins versants là où commencent les processus de ravinements. Le long des routes, à flanc de versant, le drainage n'a pas été amélioré et les excédents localisés d'eau favorisent toujours les glissements.

67 Depuis 1968, des aménagements ont été réalisés sous forme de barrages-seuils faits de gabions installés dans les différents cours d'eau du bassin versant du Rio Muerto. Toutes les œuvres réalisées ont été détruites car elles étaient souvent inadaptées, ou mal entretenues. Mais surtout les extractions de granulats en aval ont entraîné une érosion régressive, l'incision verticale des lits et leur élargissement sur plusieurs mètres. Les barrages de gabions n'ont pas résisté.

Le contrôle de l'usage des sols

68 La circulation devrait être contrôlée dans la partie haute de la Sierra, surtout dans la zone du funiculaire et autour de la route du Cerro San Javier. Organiser le cheminement des touristes sur des sentiers balisés pourrait éviter une pression trop forte sur les zones fragiles.

69 Les pratiques de conservation des sols devraient permettre d'atténuer les érosions par la rotation des cultures, la jachère, la réduction des labours, les cultures en courbes de niveau dans les secteurs en pente. Mais les agriculteurs manquent de formation. Le problème vient aussi du nombre de petits producteurs. La superficie des exploitations est insuffisante pour appliquer les techniques de conservation des sols. N'ayant pas les réserves financières leur permettant d'affronter les années difficiles, les petits paysans vont vers la ville où ils s'entassent dans les « *villas miserias* ».

70 Les exploitations de granulats en lit mineur devraient être interdites. Malgré l'existence de la Direction provinciale des Eaux qui doit surveiller les extractions, on trouve encore trop de cas d'exploitation incorrecte. Là où l'accumulation d'alluvions est très importante et provoque l'élévation du fond du lit on peut toutefois envisager l'enlèvement d'une partie de ces alluvions à condition de le faire sur toute la largeur du lit et sur égale épaisseur pour ne pas perturber le fonctionnement hydraulique.

La planification urbaine et la législation

71 Une cartographie des différents risques en fonction de leur intensité et de leur probabilité d'occurrence devrait permettre de définir un zonage pour le développement urbain à venir. Il faudrait notamment définir au moins deux types de situations :

- l'interdiction de nouvelles constructions dans les zones inondables de lit majeur exposées aux crues;
- la possibilité de construire sous conditions, notamment de drainage, dans les zones où la nappe phréatique reste élevée.

72 Actuellement les procédures se déroulent différemment. On choisit d'abord la zone de construction et ensuite on fait éventuellement des études.

73 D'autre part, les efforts de planification urbaine venant des municipalités se heurtent en Argentine aux habitudes bien ancrées : installations spontanées d'une population pauvre venue des campagnes, mais aussi corruption qui permet à certains groupes immobiliers de contourner la loi ou les décisions municipales. Quelques grandes familles disposent à la fois des pouvoirs économiques mais également politiques et se trouvent également liées à la justice, ce qui compromet d'éventuels recours lorsque la loi n'est pas appliquée.

74 Dans l'arsenal législatif il existe souvent des textes qui peuvent être utilisés en attendant des règlements plus ciblés, à condition qu'existe une volonté politique. L'exemple des véhicules tout terrain est significatif. L'article 17 de la loi n° 6253 peut être utilisé par la direction de l'Environnement de la Province de Tucuman pour mettre en route une procédure d'évaluation des impacts lors des événements sportifs se produisant dans des milieux fragiles. En fait, l'application de cette loi rencontre des difficultés. Elle s'applique seulement à des activités qui ont besoin d'une autorisation administrative, comme les rencontres sportives. D'autre part, il faut 90 jours pour mener à bien l'étude d'impacts. Cette procédure lourde convient mieux pour des activités permanentes. Il est néanmoins possible de s'entendre avec le Secrétariat des Sports national avant que l'autorisation soit donnée. Le contrôle de l'autorité environnementale de la province est en effet prévue en cas de compétitions de véhicules tout terrain. C'est ainsi que l'enduro du barrage Escaba a été interdit.

75 Mais les particuliers n'étant pas concernés par ces mesures, des projets de loi ont été rédigés depuis 1997, visant à réduire, voire interdire la circulation des véhicules tout terrain dans les aires naturelles provinciales en particulier sur le piémont, en montagne et haute montagne. Une mesure vient enfin d'être prise pour interdire les V.T.T dans la Sierra de San Javier.

La mise en réserve

76 Le Parc de la Sierra de San Javier a été créé en août 1973. La superficie protégée par le parc atteint 14 174 ha soit 74% de la Sierra de San Javier entre 650 m et 1 876 m d'altitude et sur les deux versants opposés. Il est administré par l'Université Nationale de Tucuman qui devait, dans le projet de 1948, être au cœur d'une ville universitaire. En fait existent seulement aujourd'hui l'école des gardes forestiers, une résidence universitaire, et

quelques résidences de professeurs, dans le secteur de Horco Molle, à 15 km de San Miguel de Tucuman.

- 77 L'objectif du Parc est double. Sa première mission porte sur la conservation des ressources de la zone, surtout la forêt des Yungas, même si les richesses floristique et faunistique ont déjà été amoindries par des décennies de prélèvements. Cette aire protégée est l'une des plus importantes de la province et son rôle est vital pour assurer l'équilibre hydrologique et donc l'alimentation en eau nécessaire à la population comme aux activités de production de la plaine.
- 78 Mais la 2^{ème} mission du Parc est d'accueillir et de sensibiliser le public. L'accès se fait en partie par des routes puis des pistes non revêtues. Il existe plusieurs sentiers pédestres de découverte, avec des panneaux pédagogiques assurant l'interprétation des paysages traversés. Les campements sont autorisés uniquement dans 3 sites spécifiques dont deux sont très proches de la cité universitaire de Horco Molle.
- 79 Mais tout en participant à la protection des ressources et à la prévention des risques, le parc de la Sierra de San Javier peut être aussi un atout pour le développement d'un tourisme vert lié à l'image de nature « sauvage » que véhicule le terme de Yungas, la forêt des nuages, même si celle-ci est largement une forêt secondaire.
- 80 Ainsi, les déséquilibres créés par les actions anthropiques (agriculture intensive, déboisement, pâturage, brûlis, tourisme) ont-ils abaissé le seuil de résistance d'un milieu déjà fragile, où l'augmentation des précipitations depuis les années 1970 a introduit des modifications naturelles. Face à des problèmes croissant avec l'extension urbaine de Tucuman et le phénomène de métropolisation qui caractérise la plus grande ville du nord-ouest argentin, la nécessité d'une gestion cohérente se révèle clairement. Les coûts liés aux risques « naturels » pourraient être allégés. Cette gestion doit intégrer les nouvelles conditions du fonctionnement des milieux, en associant la montagne et le piémont au niveau des bassins versants, tout en tenant compte des nouvelles dynamiques socio-économiques. Mais il s'agit là d'une vision à long terme alors que prévalent aujourd'hui les difficultés du quotidien. La crise qui frappe actuellement l'Argentine, lourdement endettée, et dont les habitants ont vu leur pouvoir d'achat chuter avec la dévaluation du peso (2002) et l'inflation, relègue souvent à l'arrière-plan les problèmes environnementaux. Il est à craindre que les améliorations dans ce domaine ne doivent attendre un assainissement de la situation économique et sociale.

BIBLIOGRAPHIE

- HUNZINGER H., 2000 - Hidrología de las selvas montanas en la sierra de San Javier. In : Breves contribuciones del IEG n°12. Instituto de Estudios geográficos, Universidad de Tucumán, p. 51-67
- MANSILLA S. et SORIA F., 2000 - Expansion territorial del Gran San Miguel de Tucumán desde 1990. In : Breves contribuciones del IEG: n°12. Instituto de Estudios geograficos, Universidad de Tucuman, p. 105-124

SAYAGO J.M. et PUCHULU, 1992 - Propuesta de bajo costo para la sistematización integrada de la cuenca del Rio Muerto (provincia de Tucuman), 1° Congr. Regional EI NOA y su medio Ambiente, S.M. Tucuman p. 159-162

SAYAGO J.M. et TOLEDO M., 1995- Efectos de los cambios climáticos en las cuencas fluviales y su relación con la ocupación de la tierras (Tucuman Argentina). Actas 1ra Reunion National de Geologia Ambiental y Ordenación del Territorio. Rio Cuarto. T 2 p.319-330.

SAYAGO J.M. et al., 2001 - El impacto ambiental de los vehiculos "todo terreno" en la provincia de Tucuman ; aspectos juridicos y geoambientales. Actas 3a reunion National y 1a del Mercosur sobre Geologia Ambiental y Ordenación del Territorio. Mar del Plata. CD : 12 p., 2 cuadros, 4 mapas.

NOTES

1.- Quartiers de maisons sommaires développés à la périphérie des villes.

RÉSUMÉS

La grande sensibilité écologique de la province de Tucuman s'explique d'abord par les forts contrastes qui existent au niveau du climat et du relief. Le climat subtropical, entre 26 et 28° de latitude Sud, offre des contrastes saisonniers importants où les précipitations estivales fortes et intenses jouent un rôle important dans les processus géomorphologiques, d'autant plus que les contrastes topographiques sont également marqués. Les pluies sont à l'origine de crues brutales accompagnées de phénomènes d'érosion et d'inondations. D'autre part, les sols développés à partir des accumulations loessiques sont particulièrement sensibles aux érosions hydrique et éolienne. Mais les actions anthropiques ont souvent aggravé cette fragilité naturelle en abaissant le seuil de résistance des différents milieux. Le développement actuel de l'agglomération de Tucuman, située au débouché du bassin versant du Rio Muerto et de l'Arroyo Las Piedras, met en évidence ces problèmes et les risques s'accroissent (aléas et vulnérabilité). La situation économique dans une Argentine en plein marasme, mais aussi la superposition des lois et des organismes rend la recherche de solutions difficile.

The ecological sensitivity of the Tucuman province can first be explained by both climate and topographic contrasts. In a subtropical area (26-28°S) strong summer rainfalls take an important part in the geomorphologic processes increased by steep stones. High intensity rainfall events create sudden floods and landslides. Loess deposits and associated soils are especially sensitive to hydric and eolian erosion. However anthropic actions have worsened this natural fragility by lowering the natural tolerance of different environments. The urban growth of Tucuman located at the end of the Rio Muerto's valley underlines these problems and risks are increasing. The economic crisis in Argentina but also the multitude of administrations and laws make even more difficult to find a solution.

INDEX

Keywords : Argentina, Argentine, landslides, natural and human factors, natural hazards, torrential floods

Mots-clés : action anthropique, crue torrentielle, facteur naturel, mouvement de masse, piémont andin, risques naturels et urbanisation

AUTEURS

MARIE-CLAIRE PRAT

Laboratoire de Géographie physique appliquée, Université Michel de Montaigne

JOSÉ MANUEL SAYAGO

Université Miguel Lillo de Tucuman (Argentine)