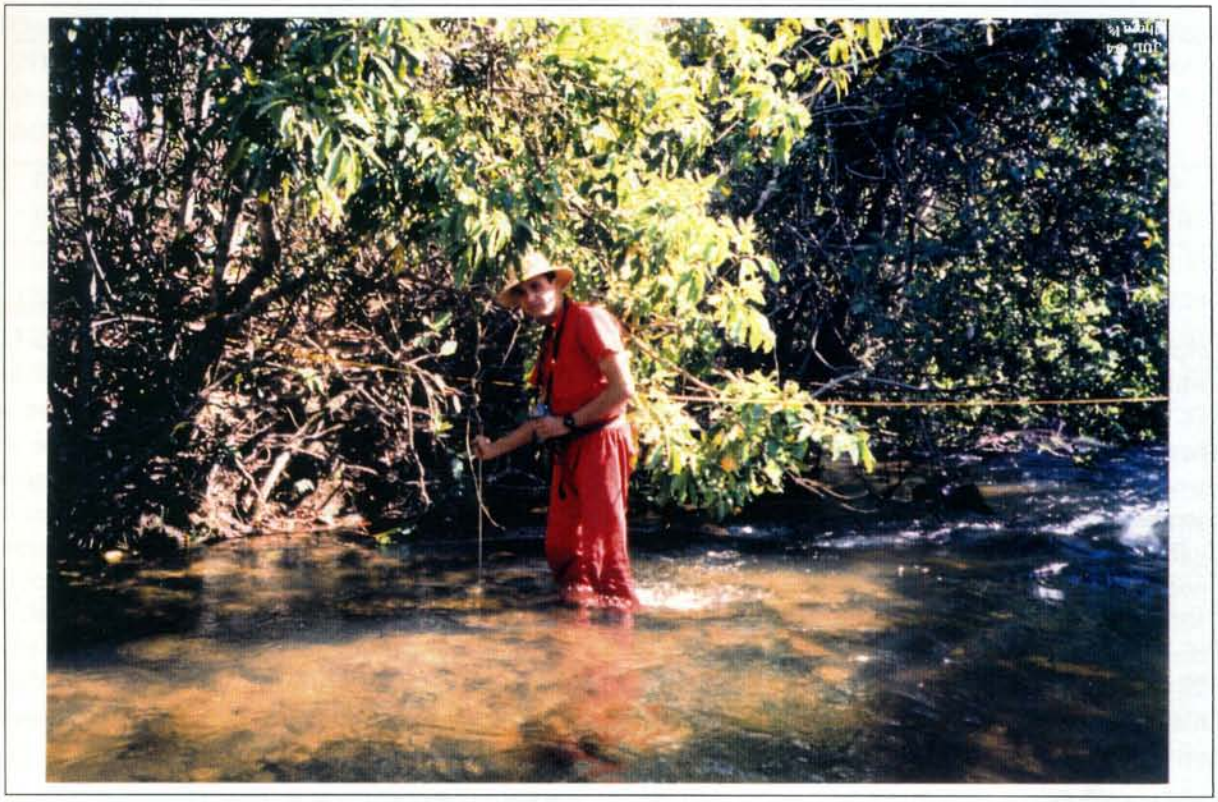

Foto / Photo 6 : Medição de vazão no Sumidouro do Rio São Mateus
Jaugeage de la perte du Rio São Mateus [Jean Loup Guyot].

Foto / Photo 7 : Ressurgência do Rio São Bernardo
Résurgence du Rio São Bernardo [Guilherme Vendramini].

BALANÇO HIDRO-GEOQUÍMICO
BILAN HYDRO-GÉOCHIMIQUE

Jean Loup GUYOT, Augusto AULER, Dulce OGA, Isabelle OBSTANCIAS & Jean Luc APPAY

Em julho de 1994, durante a expedição espeleológica Franco-Brasileira GOIÁS 94, uma equipe chamada « científica » realizou medições de vazão, revelou um certo número de parâmetros físico-químicos e efetuou uma amostragem hídrica sobre diferentes rios que atravessam o carste de São Domingos. O mês de julho de 1994 é caracterizado, em todos os postos pluviométricos da região, por uma ausência de chuva, após um mês de junho chuvoso : 92 mm na estação de São Domingos e 28 mm em Campos Belos. As vazões dos cursos d'água da região não estarão, portanto, em seu nível mais baixo de estiagem.

AS VAZÕES

As vazões foram medidas sobre 15 cursos d'água por meio da exploração do campo das velocidades na seção, com a ajuda de um micromolinete A.OTT, emprestado pela Universidade de Brasília. Para cada rio, as velocidades foram medidas sobre várias verticais (de 4 a 18, segundo a largura), totalizando 655 valores de velocidades pontuais (Quadro 3). As condições de trabalho com esse equipamento eram por vezes condições limites, principalmente nos rios São Vicente, Terra Ronca e São Bernardo (profundidade > 80 cm, velocidades > 1 m/s). A vazão da ressurgência do Rio São Vicente foi calculada pela diferença entre uma medição de descarga feita a montante e uma outra a jusante desse exutório, devido à ausência de sítio favorável à medição entre a ressurgência e a confluência. A vazão obtida na ressurgência de São Mateus é menor que a medida em julho de 1979 realizado pelo CEU (Milko, 1984). Os resultados obtidos mostram que as vazões são particularmente precisas, pois o balanço sumidouros-ressurgência é sempre equilibrado (Quadro 4). Por outro lado, esses resultados estão de acordo com os dados hidrológicos do DNAEE (ver capítulo « Hidroclimatologia da Região »).

En juillet 94, au cours de l'expédition spéléologique Franco-Brésilienne GOIÁS 94, une équipe appelée « scientifique » a réalisé des mesures de débit, relevé un certain nombre de paramètres physico-chimiques, et effectué un échantillonnage d'eau sur les différentes rivières traversant le karst de São Domingos. Le mois de juillet 94 est caractérisé sur tous les postes pluviométriques de la région par une absence de pluie, faisant suite à un mois de juin pluvieux : 92 mm à la station de São Domingos, 28 mm à Campos Belos. Les débits des cours d'eau de la région ne seront donc pas à leur plus bas niveau d'étiage.

LES DÉBITS

Les débits ont été mesurés sur 15 cours d'eau par exploration du champ des vitesses dans la section à l'aide d'un micro-moulinet A.OTT, prêté par l'Université de Brasília. Pour chaque rivière, les vitesses ont été mesurées sur plusieurs verticales (de 4 à 18, suivant la largeur), totalisant 655 valeurs de vitesses ponctuelles (Tabl. 3). Les conditions de travail avec cet équipement étaient parfois limite, notamment pour les rios São Vicente, Terra Ronca et São Bernardo (profondeur > 80 cm, vitesses > 1 m/s). Le débit de la résurgence du Rio São Vicente a été calculé par différence entre un jaugeage effectué à l'amont, et un autre à l'aval de cet exutoire, du fait de l'absence de site favorable à la mesure entre la résurgence et la confluence. Le débit obtenu à la résurgence de São Mateus est plus faible que celui mesuré en juillet 79 par le CEU (Milko, 1984). Les résultats obtenus montrent que les débits mesurés sont particulièrement précis, car le bilan perte-résurgence est toujours équilibré (Tableau 4). Par ailleurs, ces résultats s'accordent aux données hydrologiques du DNAEE (voir chapitre Hydro-Climatologie de la région).

Quadro / Tableau 3 : Características das medições de vazão / Caractéristiques des jaugeages [NV=número de verticais / nombre de verticales, NP=número de pontos de medição / nombre de points de mesure, L=largura / largeur, PM=profundidade média / profondeur moyenne, S=seção do rio / section de la rivière, VM=velocidade média / vitesse moyenne, Q=vazão / débit].

Data Date	Rio Rivière	Local Lieu	NV	NP	L (m)	PM (m)	S (m^2)	VM (m/s)	Q (m^3/s)
11/07/94	Angélica	Sumidouro / Perte	11	53	11.3	0.45	5.07	0.45	2.273
11/07/94	Bezerra	Sumidouro / Perte	6	23	6.7	0.24	1.57	0.16	0.244
11/07/94	São Vicente	Sumidouro / Perte	13	57	13.1	0.48	6.31	0.78	4.913
12/07/94	Passa Três	Sumidouro / Perte	4	14	0.7	0.18	0.12	0.19	0.022
12/07/94	São Mateus	Sumidouro / Perte	6	24	5.5	0.36	1.97	0.59	1.171
13/07/94	Imbira	Sumidouro / Perte	5	17	3.3	0.25	0.82	0.10	0.082
13/07/94	Terra Ronca	Sumidouro / Perte	10	42	9.9	0.31	3.06	0.67	2.054
13/07/94	Palmeiras	Sumidouro / Perte	8	39	8.8	0.62	5.41	0.43	2.317
13/07/94	São Bernardo	Sumidouro / Perte	10	39	9.9	0.37	3.68	0.70	2.565
14/07/94	Angélica	Ressurgência / Résurgence	13	61	13.2	0.49	6.50	0.40	2.565
15/07/94	São Vicente	Jusante Res. / Aval Rés.	15	72	15.0	0.56	8.45	0.90	7.564
15/07/94	São Vicente	Montante Res. / Amont Rés.	11	59	11.2	0.70	7.85	0.33	2.553
16/07/94	São Mateus	Ressurgência / Résurgence	10	44	9.4	0.57	5.38	0.24	1.273
23/07/94	Terra Ronca	Ressurgência / Résurgence	10	40	10.6	0.38	4.06	0.54	2.195
24/07/94	São Bernardo	Ressurgência / Résurgence	18	71	17.8	0.37	6.55	0.77	5.032

Quadro / Tableau 4 : Vazões específicas e influência da Serra Geral (Julho de 1994) / Débits spécifiques et influence de la Serra Geral (Juillet 1994) [Sup. Tot.=superfície total da bacia / superficie totale du bassin, Q=vazão / Débit, qs=vazão específica / débit spécifique, Sup. SG=superfície da bacia na Serra Geral / superficie du bassin dans la Serra Geral, Q SG=parte da vazão que provém da Serra Geral / part du débit qui provient de la Serra Geral, qs SG=vazão específica calculada para a Serra Geral / débit spécifique calculé pour la Serra Geral, Sup.* SG=superfície estimada da bacia real na Serra Geral / superficie estimée du bassin réel dans la Serra Geral].

Rio Rivière	Local Lieu	Sup. Tot. (km^2)	Q (m^3/s)	qs (l/s.km^2)	Sup. SG (km^2)	Q SG (m^3/s)	qs SG (l/s.km^2)	Sup.* SG (km^2)
Angélica	Sumidouro / Perte	101	2.27	23	20	1.95	99	216
Bezerra	Sumidouro / Perte	53	0.24	5	0			
Angélica	Ressurgência / Résurgence	168	2.57	15				
São Vicente	Sumidouro / Perte	127	4.91	39	39	4.56	118	507
Passa Três	Sumidouro / Perte	9	0.02	3	0			
São Vicente	Ressurgência / Résurgence	157	5.01	32				
São Mateus	Sumidouro / Perte	72	1.17	16	5	0.90	173	100
Imbira	Sumidouro / Perte	20	0.08	4	0			
São Mateus	Ressurgência / Résurgence	114	1.27	11				
Terra Ronca	Sumidouro / Perte	102	2.05	20	9	1.68	186	187
Terra Ronca	Ressurgência / Résurgence	116	2.20	19				
Palmeiras	Sumidouro / Perte	80	2.32	29	21	2.08	101	231
São Bernardo	Sumidouro / Perte	89	2.57	29	9	2.25	258	250
São Bernardo	Ressurgência / Résurgence	189	5.03	27				

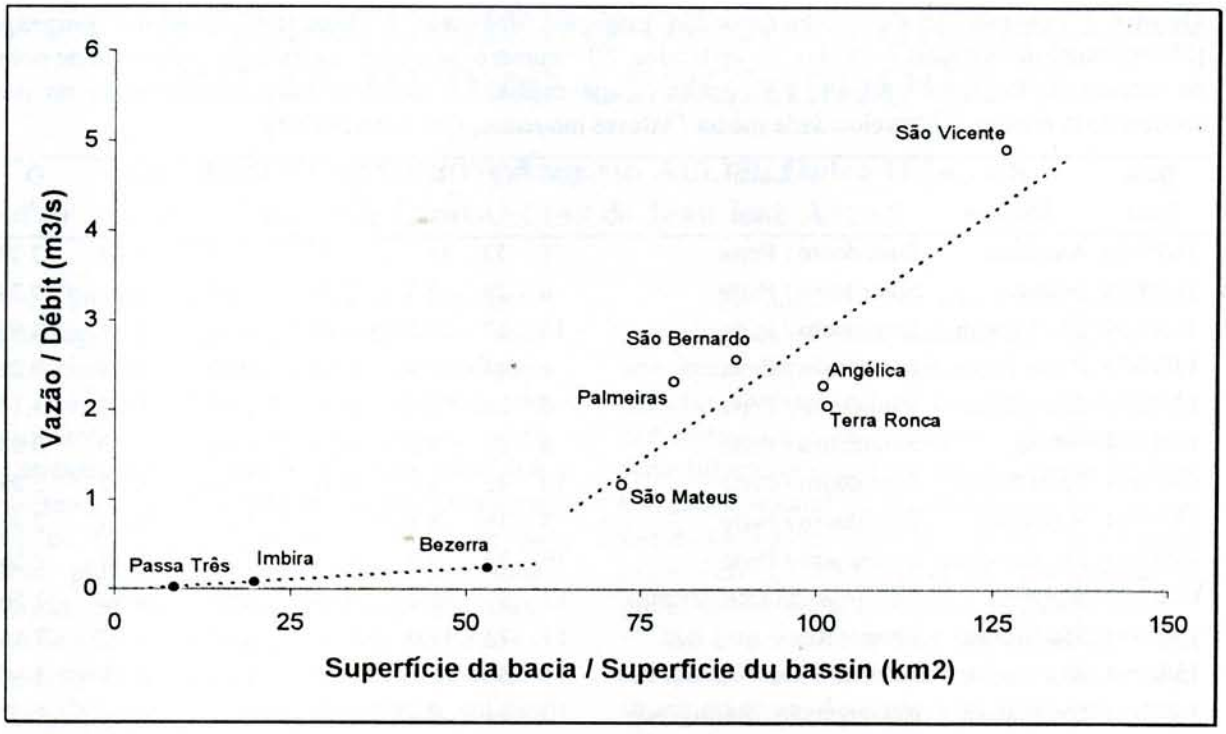

Fig. 17 : Vazão dos sumidouros vs. superfície da bacia / débit des pertes vs. superficie du bassin.

O gráfico vazão dos sumidouros vs. superfície (Fig. 17) individualiza claramente os cursos d'água oriundos da Serra Geral de outros cursos d'água. Os valores das vazões específicas dos rios Bezerra, Passa Três e Imbira, que não recebem nenhum afluente da Serra Geral, variam de 3 a 5 l/s.km² (Quadro 4). Esses valores, que se referem apenas ao mês de julho de 1994, são idênticos ao valor médio observado para esse mês no Rio Paranã. Utilizando-se o valor médio de 4 l/s.km² para os cursos d'água da região naquela época, e conhecendo-se a parte da bacia superficial que se estende sobre a Serra Geral (Sup. SG), a vazão proveniente da Serra Geral pôde ser calculada (Q SG). As vazões assim obtidas não são compatíveis com as superfícies das bacias de superfície (qs SG > 99 l/s.km²), e está claro que a Serra Geral contribui para a vazão desses rios bem além dos limites supostos dessas bacias hidrográficas. Tomando-se o valor médio dos rios oriundos da Serra Geral, isto é, 9 l/s.km², é possível estimar a superfície real das bacias da Serra Geral capturadas pelos rios da região de São Domingos (Sup.* SG).

Le graphique débit des pertes vs. superficie (Fig. 17) individualise clairement les cours d'eau issus de la Serra Geral des autres cours d'eau. Les valeurs des débits spécifiques des rivières Bezerra, Passa Três et Imbira, qui ne reçoivent aucun apport de la Serra Geral, varient de 3 à 5 l/s.km² (Tableau 4). Ces valeurs, qui ne concernent que le mois de juillet 94, sont identiques à la valeur moyenne observée pour ce même mois sur le Rio Paranã. En utilisant la valeur moyenne de 4 l/s.km² pour les cours d'eau de la région à cette époque, et connaissant la partie du bassin superficiel s'étendant sur la Serra Geral, (Sup. SG) le débit provenant de la Serra Geral a pu être calculé (Q SG). Les débits ainsi obtenus ne sont pas compatibles avec les superficies des bassins de surface (qs SG > 99 l/s.km²), et il est manifeste que la Serra Geral contribue au débit de ces rivières, bien au delà des limites supposées de ces bassins versants. En prenant la valeur moyenne pour le mois de juillet des débits spécifiques des rivières issues de la Serra Geral, soit 9 l/s.km², il est possible d'estimer la superficie réelle des bassins de la Serra Geral capturés par les rivière de la région de São Domingos (Sup.* SG).

Esses resultados, mostrando várias centenas de km² da Serra Geral drenados para o Rio Paranã, são coerentes com os obtidos a partir de longas séries cronológicas de vazão sobre as bacias dos rios São Domingos, São Vicente e São Mateus. A partir das vazões nas ressurgências e nos sumidouros, um balanço hídrico « entrada-saída » do maciço calcário pôde ser realizado (Quadro 5). As diferenças de vazão (dQ) entre entradas e saídas da Serra do Calcário são sempre positivas, com valores coerentes, o que atesta, a posteriori, a boa qualidade das medições de descarga feitas. Esse balanço repousa sobre a planimetragem das bacias a partir de mapas topográficos do IBGE em escala 1/100 000 (Guarani de Goiás e São Domingos). Os limites das bacias hidrográficas em região de carste, com a ajuda da topografia de superfície, são tão-somente aproximações. Os valores de vazão específica (qs Calc.) para Terra Ronca e São Mateus-Imbira estão equivocados devido a uma provável superestimação da superfície do sistema de São Mateus-Imbira em detrimento ao de Terra Ronca. O valor médio da vazão específica do maciço calcário naquela época do ano é de aproximadamente 5 l/s.km².

Ces résultats, qui montrent que plusieurs centaines de km² de la Serra Geral sont drainés vers le Rio Paranã, sont cohérents avec ceux obtenus à partir de longues séries chronologiques de débit sur les bassins des rios São Domingos, São Vicente et São Mateus. A partir des débits aux résurgences et aux pertes, un bilan hydrique 'entrée-sortie' du massif calcaire a pu être réalisé (Tableau 5). Les différences de débit (dQ) entre entrées et sorties de la Serra do Calcário sont toujours positives et les valeurs sont cohérentes, ce qui à posteriori atteste de la bonne qualité des jaugeages effectués. Ce bilan repose sur le planimétrage des bassins à partir des cartes topographiques de l'IBGE au 1/100 000 (Guarani de Goiás et São Domingos). Les limites des bassins versants en région karstique à l'aide de la topographie de surface ne sont que des approximations. Les valeurs de débit spécifique (qs Calc.) pour Terra Ronca et São Mateus - Imbira sont erronées, du fait d'une probable surestimation de la superficie du système São Mateus - Imbira au détriment de celui de Terra Ronca. La valeur moyenne du débit spécifique du massif calcaire à cette époque de l'année est d'environ de 5 l/s.km².

Quadro / Tableau 5 : Vazões específicas e influência da Serra do Calcário (Julho de 1994) / Débits spécifiques et influence de la Serra do Calcário (Juillet 1994) [Sup. Tot.=superfície total da bacia / superficie totale du bassin, Sup. Calc.=superfície do calcário na bacia / superficie des calcaires dans le bassin, Q=vazão / débit, dQ=diferença de vazão ressurgência - sumidouros / différence de débit résurgence - pertes, qs Calc.=vazão específica da Serra do Calcário / débit spécifique des calcaires].

Rio Rivière	Local Lieu	Sup. Tot. (km²)	Sup. Calc. (km²)	Q (m³/s)	dQ (m³/s)	qs Calc. (l/s.km²)
Angélica	Sumidouro / Perte	101		2.27		
Bezerra	Sumidouro / Perte	53		0.24		
Angélica	Ressurgência / Résurgence	168	14	2.57	0.05	3.5
São Vicente	Sumidouro / Perte	127		4.91		
Passa Três	Sumidouro / Perte	9		0.02		
São Vicente	Ressurgência / Résurgence	157	22	5.01	0.08	3.5
São Mateus	Sumidouro / Perte	72		1.17		
Imbira	Sumidouro / Perte	20		0.08		
São Mateus	Ressurgência / Résurgence	114	22	1.27	0.02	0.9
Terra Ronca	Sumidouro / Perte	102		2.05		
Terra Ronca	Ressurgência / Résurgence	116	14	2.20	0.14	10.0
Palmeiras	Sumidouro / Perte	80		2.32		
São Bernardo	Sumidouro / Perte	89		2.57		
São Bernardo	Ressurgência / Résurgence	189	20	5.03	0.15	7.4

A GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS

Durante medições de vazão nos sumidouros e ressurgências do maciço calcário de São Domingos (Fig. 2), as medições de temperatura, de pH, de condutividade e de turbidez da água foram feitas in situ (Quadro 6). Esses resultados, que apenas são representativos da estação de águas baixas (julho de 1994), dão, contudo, indicações interessantes sobre o funcionamento do sistema de carste. Os rios oriundos da Serra Geral apresentam águas ácidas (pH < 7) e condutividades muito fracas, quando a maior parte de sua bacia na Serra Geral é considerável. Com uma condutividade de 1µS/cm, a água destilada escorre no Rio São Vicente. A travessia da Serra do Calcário por cursos d'água traduz-se por um aumento sensível do pH e da condutividade, devido a contribuições hídricas mais carregadas de elementos dissolvidos de outros rios (rios Bezerra, Passa Três, Pau Pombo, Imbira), assim como do próprio carste. Os escoamentos superficiais Pau Pombo e Passa Três, que drenam zonas calcárias, apresentam pH e condutividades elevados.

LA GÉOCHIMIE DES EAUX

Lors des mesures de débit aux pertes et résurgences du massif calcaire de São Domingos (Fig. 2), les mesures de la température, du pH, de la conductivité et de la turbidité de l'eau ont été réalisées in situ (Tabl. 6). Ces résultats qui ne sont représentatifs que de la saison de basses eaux (juillet 94) donnent toutefois des indications intéressantes sur le fonctionnement du système karstique. Les rivières issues de la Serra Geral présentent des eaux acides (pH < 7) et des conductivités très faibles, et ce d'autant plus que la part de leur bassin dans la Serra Geral est importante. Avec une conductivité de 1 µS/cm, c'est de l'eau distillée qui s'écoule dans le Rio São Vicente. La traversée de la Serra do Calcário par ces cours d'eau se traduit par une augmentation sensible du pH et de la conductivité, du fait des apports en eau plus chargée en éléments dissous des autres rivières (rios Bezerra, Passa Três, Pau Pombo, Imbira), et des apports du karst lui même. Les ruisseaux Pau Pombo et Passa Três qui drainent des zones calcaires présentent des pH et conductivités élevés.

Quadro / Tableau 6 : Medições físico-químicas / Mesures physico-chimiques [Q=vazão / débit, Temp.= temperatura / température, Cond.=condutividade / conductivité, Turb.=turbidez / turbidité].

Data Date	Hora Heure	Rio Rivière	Local Lieu	Q (m^3/s)	Temp. (° C)	pH	Cond. (µS/cm)	Turb. (NTU)
11/07/94	11h30	Angélica	Sumidouro / Perte	2.273	22.6	5.9	8	1
11/07/94	15h20	Bezerra	Sumidouro / Perte	0.244	22.9	7.0	29	6
14/07/94	12h25	Angélica	Ressurgência / Résurgence	2.565	21.7	6.3	18	2
11/07/94	17h15	São Vicente	Sumidouro / Perte	4.913	24.0	5.6	1	1
12/07/94	10h30	Passa Três	Sumidouro / Perte	0.022	19.1	8.0	247	0
15/07/94	13h00	São Vicente	Ressurgência / Résurgence	5.011	23.0	6.6	27	3
12/07/94	14h00	São Mateus	Sumidouro / Perte	1.171	22.3	6.3	9	3
13/07/94	10h30	Pau Pombo	Sumidouro / Perte	0.003	19.0	7.6	170	0
13/07/94	11h40	Imbira	Sumidouro / Perte	0.082	20.3	7.3	80	17
16/07/94	11h30	São Mateus	Ressurgência / Résurgence	1.273	21.9	7.3	92	3
13/07/94	13h30	Terra Ronca	Sumidouro / Perte	2.054	22.9	6.4	17	2
23/07/94	15h20	Terra Ronca	Ressurgência / Résurgence	2.195	22.9	6.9	30	1
13/07/94	15h30	Palmeiras	Sumidouro / Perte	2.317	23.6	5.8	4	8
13/07/94	17h00	São Bernardo	Sumidouro / Perte	2.565	23.5	6.5	13	3
24/07/94	15h45	São Bernardo	Ressurgência / Résurgence	5.032	23.7	6.5	29	24

Quadro / Tableau 7 : Balanço dos fluxos de matéria em solução / Bilan des flux de matières en solution [S Tot.=superfície total da bacia / superficie totale du bassin, S Calc.=superfície dos calcários na bacia / superficie des calcaires dans le bassin, Q=vazão / débit, Cond.=condutividade / conductivité, MD=matéria em solução / matières en solution, QD=fluxo de MD / flux de MD, QD Calc.=fluxo de MD que provém dos calcários / flux de MD qui provient des calcaires, ER=taxa de erosão / taux d'érosion, ER Calc.=taxa de erosão para os calcários / taux d'érosion pour les calcaires].

Rio Rivière	Local Lieu	S Tot. (km^2)	S Calc. (km^2)	Q (m^3/s)	Cond. (µS/cm)	MD (mg/l)	QD (t/d)	QD Calc. (t/d) (t/j)	ER ($t/km^2.ano$)	ER Calc. ($t/km^2.ano$)
Angélica	Sumid. / Perte	101		2.27	8	6	1.1		4	
Bezerra	Sumid. / Perte	53		0.24	29	20	0.4		3	
Angélica	Ress. / Rés.	168	14	2.57	18	12	2.7	1.2	6	33
São Vicente	Sumid. / Perte	127		4.91	1	1	0.3		1	
Passa Três	Sumid. / Perte	9		0.02	247	170	0.3		14	
São Vicente	Ress. / Rés.	157	22	5.01	27	19	8.0	7.4	19	126
São Mateus	Sumid. / Perte	72		1.17	9	6	0.6		3	
Imbira	Sumid. / Perte	20		0.08	80	55	0.4		7	
São Mateus	Ress. / Rés.	114	22	1.27	92	63	7.0	5.9	22	97
Terra Ronca	Sumid. / Perte	102		2.05	17	12	2.1		7	
Terra Ronca	Ress. / Rés.	116	14	2.20	30	21	3.9	1.8	12	48
Palmeiras	Sumid. / Perte	80		2.32	4	3	0.6		3	
São Bernardo	Sumid. / Perte	89		2.57	13	9	2.0		8	
São Bernardo	Ress. / Rés.	189	20	5.03	29	20	8.7	6.1	17	110

Como todos os elementos maiores em solução não foram analisados, a carga total em matéria dissolvida (MD) foi estimada a partir do valor da condutividade (Rodier, 1964). Os resultados obtidos (Quadro 7) permitem calcular os fluxos de matérias em solução (Q MD) transportadas através dos diferentes sistemas de carste. Por diferença entre as entradas (sumidouros) e as saídas (ressurgências) do maciço calcário, o fluxo de matérias dissolvidas que provém da Serra do Calcário (Q MD Calc.) pôde ser calculado. Relacionando esses valores com a superfície dos afloramentos calcários (S Calc.), é obtida uma taxa de erosão (ER Calc.). Esses valores são somente aproximações, devido à ausência de monitoramentos regulares das vazões e da química das águas ao longo do ciclo hidrológico, porém permitem que se tenha uma ordem de grandeza das velocidades de dissolução desse maciço calcário. Esses resultados mostram que entre 5 e 10 milhões de anos no futuro, a Serra do Calcário terá desaparecido se as condições hidroclimáticas atuais persistirem.

Tous les éléments majeurs en solution n'ayant pas été analysés, la charge totale en matière dissoute (MD) a été estimée à partir de la valeur de la conductivité (Rodier, 1964). Les résultats obtenus (Tabl. 7), permettent de calculer les flux de matières en solution (Q MD) transportées à travers les différents systèmes karstiques. Par différence entre les entrées (pertes) et les sorties (résurgences) du massif calcaire, le flux de matières dissoutes qui provient de la Serra do Calcário (Q MD Calc.) peut être calculé. En rapportant ces valeurs à la superficie des affleurements calcaires (S Calc.), un taux d'érosion est obtenu (ER Calc.). Ces valeurs ne sont que des approximations, du fait de l'absence d'un suivi régulier des débits et de la chimie des eaux au cours du cycle hydrologique, mais elles permettent néanmoins d'avoir un ordre de grandeur des vitesses de dissolution de ce massif calcaire. Ces résultats montrent qu'entre 5 et 10 millions d'années, la Serra do Calcário aura disparu si les conditions hydro-climatiques actuelles persistent.