

LES KARSTS SOUS COUVERTURE (sableuse, argileuse, et/ou détritique) en France, d'après des travaux récents

Jean NICOD

Azterturiko 7 motetatik (1 taula) lehen hirurak ondo ordezkaturik ageri dira: itiostratigrafi ukipenezko karstak, buztinezko estaldurapekoak, harea eta hareharrizko caprock dun homituriko malda-karstak, alterita eta silize-barreiaduren (klera-karsten suharrizko buztina, silize-buztina, siderolitikoa, terra-rossa) estaldurapeko karstak. Azken hauek aspaldiko bilakaera jasan dute eta paleokarstak dituzte. Morenen azpiko karst-ak goilautadak Erdialdeko Jura-n bakarrik aurkitzen dira.

Estaldura hauek urak karstetan sartzeko baldintzak eta uraseturiko aldearen funtzionamendua aldarazten dituzte (fenomeno artesiarrak, buztinezko tapoiak...). Podzolezko eta zoikatzezko lurzoruak direla kausa, sarturiko uraren korrosio-abalmenak sakoneko karst-en kriptaldaketa eta bilakaera bideratzen ditu. Amaitzeko, azalerrako formak, dolinak eta «beoiak» hala-holakoak badirudite ere, eta askotan tapoiaz homiturik, sufusio-fenomenoen maiztasuna benazko arrisku geoteknikoa du.

De 7 tipos estudiados (tabla 1) los tres primeros esta bien representados: karsts de contacto litostratigráfico, bajo recubrimiento arcillos, karsts de cuesta con caprock de arena y arenisca, karsts bajo recubrimiento de alteritas y de esparcimientos de sílice (arcilla de pedernal de los karsts de la tiza, arcilla de sílice, siderolítica, terra-rossa). Estos últimos son de evolución antigua y contienen paleokarsts. Únicamente las altiplanicies del Jura central tienen karsts bajo las morenas.

Estos recubrimientos modifican las condiciones de penetración de las aguas en el karsts y de funcionamiento de la zona anegada (fenómenos artesianos, taponamientos arcillosos...). Debido a los suelos podsólicos et de turba, las aguas infiltradas tienen un poder corrosivo que permite el avance de la criptoalteración y la evolución del karsts profundo. Para terminar si las formas de superficie, dolinas o «fosas» parecen mediocres y a menudo taponadas, la frecuencia de los fenómenos de sufusión constituye un riesgo geotécnico importante.

Sur 7 types recensés (tabl. 1), les trois premiers sont bien représentés: karsts de contact lithostratigraphique, sous couvert argileux, karsts de cuesta à caprock sabla-gréseux, karsts sous couvert d'alterites et d'épandages siliceux (argile à silex des karsts de la craie, argile à chailles, sidérolithique, terra-rossa). Ces derniers sont d'évolution ancienne, et incorporent des paléo-karsts. Seuls les hauts plateaux du Jura central ont des karsts sous-morainiques.

Ces couvertures modifient les conditions d'introduction des eaux dans le karst, et de fonctionnement de la zone noyée (phénomènes artésiens, colmatages argileux...). Grâce aux sols podzoliques et tourbeux, les eaux infiltrés ont un pouvoir corrosif permettant la progression de la crypto-altération et l'évolution du karst profond. Enfin si les formes de surface, dolines ou «fosses» paraissent médiocres et souvent colmatées, la fréquence des phénomènes de suffosion constitue un risque géotechnique important.

Lors de ce qui fut hélas ! notre dernière rencontre, en avril 1991, à l'Université des Pays Basques à Vitoria-Gasteiz où il m'avait fait inviter, Felix UGARTE avait eu l'amabilité de me faire visiter un des karsts de moyenne altitude des environs. Nous avons donc parcouru ensemble la Sierra d'Andia-Urbasa-Entsia, long plateau forestier, vers 1100-1300 m d'altitude, karst classé par UGARTE (1989) dans le domaine "Navarro-Alaves". Ce plateau est un synclinal perché de calcaires du Paléocène et de l'Eocène recouverts d'une formation sableuse altérée. Il présente de nombreuses formes karstiques superficielles: crypte-lapiés récemment dégagés, dolines, ouvalas et petits poljés structuraux. Des petits cours d'eau se perdent dans des ponors et leurs eaux aboutissent aux grosses sources des reculées. Ce karst, décrit par ALONSO-RAMIREZ (1990) est extrêmement intéressant pour l'étude d'une évolution sous couverture sableuse; par sa végétation forestière et ses sols podzoliques, il occuperait une position intermédiaire entre certains karsts du Périgord (Forêt de la Bessède, etc.) et certains plateaux jurassiens. A la suite des échanges d'idées que nous avons eus alors et en souvenir de F. UGARTE, il m'a semblé utile de recenser et de classer les karsts français évoluant sous une couverture sableuse, argileuse, et/ou détritique, en examinant quelques types, d'après des travaux récemment publiés et de dégager quelques comparaisons.

I - TYPES DE KARSTS SOUS COUVERTURE

Bien que l'on puisse recenser 7 types principaux (tabl. I et fig. 1) en fonction de la couverture et le contexte géomorphologique, ils sont inégalement représentés, et certains n'ont été étudiés que récemment (Thèses de J. RODET, 1991 et de P. GAMEZ, 1992). D'autres sont connus depuis longtemps mais mériteraient ré-étude; enfin les mesures hydrochimiques, surtout orientées vers la potabilité de l'eau, sont tellement disparates que les comparaisons sont difficiles.

La plupart de ces plateaux karstiques se trouvent dans le Bassin Parisien et le Bassin d'Aquitaine: les dénivelées médiocres de leurs réseaux n'ont pas contribué à entretenir un grand enthousiasme pour les explorations spéléologiques, encore que les recherches effectuées par les clubs locaux soient nombreuses et sérieuses. De nombreux traçages ont été réalisés, certains depuis plus d'un siècle: ainsi en Forêt d'Othe, pour l'adduction des eaux des sources de la Vanne vers Paris, dès 1867 par l'Ingénieur BELGRAND, puis vers 1900 par LE COUPPEY DE LA FOREST (cf. Historique des recherches hydrokarstiques dans le Pays d'Othe, in RODET, 1991). Enfin, les géomorphologues se sont préoccupés depuis longtemps de l'évolution de certains de ces karsts, particulièrement ceux sous les altérites, en Aquitaine septentrionale (ENJALBERT 1947, FENELON, 1951).

1- Les karsts de contact litho-stratigraphique, sous couverture argileuse

Ils sont très étendus dans la partie orientale du Bassin Parisien, en Lorraine et sur les confins bourguignons. Mais un seul secteur a été étudié d'une manière très méthodique: celui

Tableau I - Principaux types de plateaux karstiques sous couverture argileuse, sableuse et/ou détritique
Les exemples extérieurs à la France sont figurés-en Italique

TYPES	Région	Exemple	Couverture Substrat	Morphologie	Hidrologie	Références
1-de contact lithostratigraphique	Lorraine N	Wolevre NE	<i>argiles de W</i> talc. bathoniens	dolines «rondvaux»	divergence artésianisme	GAMEZ'92
2-de cuesta à couverture sablo-gréseuse	Champagne	Montagne de Reims Forêt d'Othe	<i>sabl. grès éocènes</i> craie sénonienne	dolines avens, dolines réseaux importants	k. d'introduction pertes en vallée «bimes» artésian.	RODET, 91-92 -id-
3a-Craie sous argile à silex	Normandie	Pays de Caux Eurer	<i>argile à silex</i> + sables & loess	vallées sèches bétorres=doltnes qq. réseaux import.	circul. vadose nappe phréatique	CALBA & al. 79 RODET. 91-92
3b-K. sous argile à chailles	E. Bassin Parisien	Nivernais	<i>argile à chailles</i> talc. jurassiques	vallées seches suffosion, dolines	circul. vadose	BRAQUE, 61 COUTURAUD -ORANGE, 89 FENELON, 51
3c-K. & Paléokarst sous sidérolithique	Périgord	Ft. de la Bessède Sarladais	<i>meulières + sidérol.</i> talc. crétacés <i>sidérol. l</i> talc. gréseux coniac.	plateau, sols podzoliques «Pechs & plaines» karst à mogotes	qq. pertes nappe phreatique	Id. & SALOMON -ASTRUC, 92
3d-K. méditerranéen sous terra-rossa	Provence	Pl. d'Albion	<i>terra-rossa+silex</i> talc. urgoniens	paléo-polje? dolines, avens	partie impluvium de F de Vaucluse	JULIAN-NICOD 89
3e-k.dolomitique	Causses	W. Causse Noir	arene dolomitique	ruiniformes		AMBERT, 91, 92
4a-K. sous-alluvial alluv. anciennes	S. Touraine	k. d'Ardentes	<i>alluv. anciennes</i> talc. bathoniens	dolines	?	B.R.G.M. 75
4b-K. sous alluvions récentes	Quercy	Vallée du Lot (Puy-l'Evêque)	terrasses dans lobes de méandres	dolines		B.R.G.M. 85
5-K. sous moraines.'	Jura -	Frasne-Bonnevaux Les Molunes	moraines Würm/Jura. id. calotte locale	entonnoirs absorb dolines, ouvalas	marais, tourbières tourbières	BOSSARD 70 NEYROUD 84 NICOD, 90
6-K. sous form. éol. 6a-sous loess 6b-sous-dunaires	Pologne S. Maroc Atlant.	Plat de Lublin k. de Safi	loess/Crétacé dunes/Jurass.	dolines -id- et réseaux		GLAZEK & al 82 WEISROCK & LUNSKI, 87
7-K. sous pyroclasts	Italie	Apennin Central	cendres volcaniq.	évolution des poljés		RAFFY 77

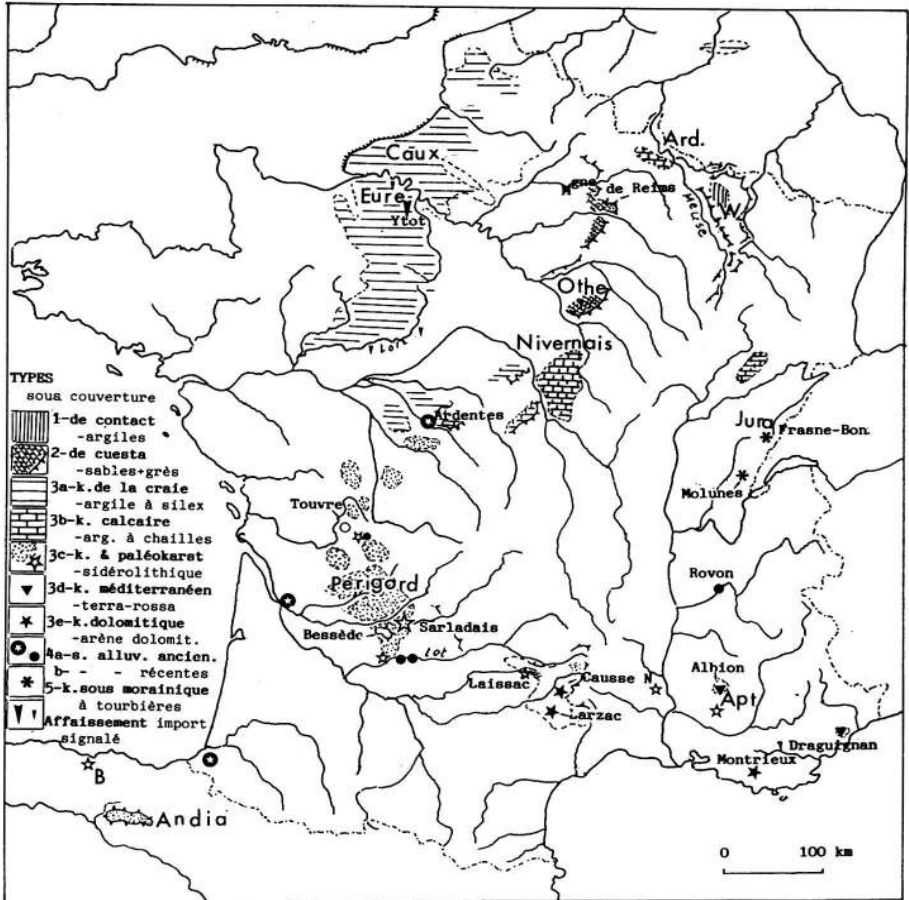


Fig. 1 - Carte de situation des principaux karsts sous couverture. Typologie cf. Tabl. I.

de la Woëvre septentrionale, en Lorraine du NE, avec les bassins de l'Othain, du Loison et de la Thinte (GAMEZ, 1979, 1991, 1992). C'est un secteur des "Côtes" de Lorraine, où les calcaires bathoniens du revers de la Côte de Moselle s'enfoncent doucement sous la série argilo-sableuse et gréseuse du Callovien-Oxfordien inférieur de la Woëvre (fig. 2). Cette série monoclinale est affectée par un système de failles de direction varisque (NE-SW), par ailleurs le réseau hydrographique, orienté vers la NNW, défonce la dépression orthoclinale de la Woëvre en avant de la Côte de Meuse: pour ces deux raisons le contact argile/calcaire est affecté de nombreuses complications, où l'érosion karstique intervient.

Ce dispositif est très important au point de vue hydrogéologique. Le ruissellement sur les interfluvés argilo-gréseux, spécialement celui des vallons hémicycliques appelés "rondvaux" (cf. infra) se perd au contact des calcaires bathoniens. Dans ces calcaires prédomine un écoulement phréatique, nappe libre à l'amont, captive à l'aval, mais combinée avec des cir-

culations plus rapides, drains ayant développé un cavernement. Cette nappe alimente des sources pérennes au niveau des vallées et réalimente les nappes des alluvions. Localement les émergences sont artésiennes, comme les "Bouillons" de Delut, jaillissements intempestifs jusque dans les rues de la localité ! On note aussi des soutirages karstiques d'un cours d'eau vers un autre: Othain au profit du Loison, et aux environs de l'Etang d'Amel, Loison supérieur au profit de l'Orne, affluent de la Moselle, donc un des derniers avatars de ses conquêtes sur le bassin de la Meuse.

Les formes karstiques sont nombreuses, mais les dépressions souvent peu caractéristiques du fait du feutrage des colluvions et des sols, sous couvert forestier. Les dolines, du type gouffre-perle colmaté sont très nombreuses dans les interfluvies (Bois de Marville près de Dulut, Bois Le Prêtre...). Quand le bouchon cède, les parois du gouffre apparaissent. Certaines dolines absorbantes, dans la forêt domaniale de Spincourt ont jusqu'à 20 à 30 m de diamètre et 5 à 7 m de profondeur; des écoulements affluents entaillent les argiles (GAMEZ & HALL, 1991). Ce sont des formes caractéristiques d'un "*karst d'introduction*" (RODET, 1991. 92). Divers conduits et grottes ont été explorés. Celle de la rivière souterraine du Failly, dans le Bathonien, dans le bassin de Delut, est générée au départ par un écoulement de nappe captive, au contact du toit marneux callovien (GAMEZ, 1992, p. 331).

Les "*mardelles*"; petites dépressions ubiquistes, très répandues dans les terrains argileux et marneux du Bassin Parisien, et même la meulière de Brie, ne sont pas de véritables dolines, mais des formes de suffosion affectant un micro-karst couvert (COLIN & GODARD, 1962, GAMEZ, 1992). Ce sont des formes holocènes, et non des cicatrices de pingos, comme cela fut parfois envisagé. De plus, dans ces régions il peut y avoir confusion entre dépressions naturelles et trous d'obus colmatés de la guerre de 1914-18. Les "*rondvaux*", vallons à tête hémicyclique, développés dans les formations argilo-gréseuses sont des formes majeures, anciennes, et composites: pour expliquer leur genèse, GAMEZ et SARY (1979) font intervenir l'action du ruissellement, la gélifluxion périglaciaire et le soutirage karstique à l'aval. Ces processus rendent compte de la masse d'argile stockée dans les conduits karstiques, et y transitant (nous reviendrons sur ce dernier point, infra II, 1, d).

2 - Les karsts de cuesta à couverture gréseuse ou sablo-gréseuse

On sait que le plus grand réseau du monde, celui de la Mammoth Cave-Flint Ridge System, au Kentucky, se trouve dans un plateau calcaire (mississipien), sous un cap-rock de grès pennsylvanien. Dans le Bassin Parisien deux cuestas - bien modestes - offrent un dispositif comparable: la Montagne de Reims et la Forêt d'Othe. Ces deux cas, ré-étudiés par RODET (1991-92) sont ceux de karsts de la craie, sous couverture de sables paléocènes-éocènes souvent grésifiés, esquissant une corniche, plus résistante que la craie sous-jacente en période froide, comme l'a bien démontré TRICART dès 1952 (cf TRICART, 1967).

a) Dans la *Montagne de Reims*, vaste plateau forestier à rebord festonné, en raison du faible pendage, ce sont les sables du Sparnacien, cimentés en "burge", qui constituent l'horizon le plus résistant de la couverture tertiaire. Les formes liées au ruissellement et aux sources des nappes suspendues dans la couverture tertiaire sont importantes et constituent un exemple classique de karst d'introduction (RODET, 1991 a, § 3.4.1.): ce sont de vastes et profondes dolines absorbantes, comme la "fosse" du Creuzin (34 m de profondeur) ou la "fosse" Martin Godard, cette dernière en relation avec la Grande Fontaine de Verzy, émergence importante du karst crayeux, située au pied de la cuesta.

b) Le *Pays d'Othe* (ou Forêt d'Othe), en raison d'un pendage plus important, se présente comme une cuesta plus nette et plus élevée (299 m). La couverture sablo-gréseuse tertiaire

est découpée en lanières par les vallées cataclinales. Et le caractère plus énergique du relief permet de bien distinguer un karst de front et un karst de revers (fig. 2 B). C'est ce dernier, qui dans notre optique, est le plus intéressant.

Sur le revers, et en milieu forestier les ruisseaux sont d'abord pérennes, alimentés par de nombreux sources; ils sont absorbés plus à l'aval par des pertes, et leurs eaux aboutissent aux grosses sources de la vallée de la Vanne. De très nombreux traçages ont été réalisés (carte synthétique in RODET 1991 A, Fig. 302) pour la dérivation des eaux dans l'aqueduc qui alimente Paris. D'importants réseaux ont été reconnus, particulièrement la rivière souterraine de la Guinand à laquelle on accède par des puits. Dans ces réseaux une circulation torrentielle est superposée à un écoulement phréatique. Les variations rapides de débits aux entrées, et les déboussés de conduits expliquent les "crevaisons" émergences brutales qui se produisent au voisinage des exutoires: exemples de la diaclase de la Noé, et des "bimes" gouffres émissifs (cheminées d'équilibre fonctionnelles), apparus subitement, comme la Bime des Enfants, la Bime de Mineroy, etc. (RODET, 1991 a, chap. 7.1) et d'autres phénomènes d'artésianisme.

3 - Les karsts et paléokarsts à couverture d'altérites

Ils sont très nombreux, mais d'une très grande variété, en raison de la nature de la couverture et du substratum calcaire, du degré d'incision des vallées, et de l'inégalité des héritages paléokarstiques.

a) *Les karsts de la craie sous couverture d'argile à silex.*

Les plus caractéristiques sont le Pays de Caux et le plateau entre Loir et Iton, tous deux en Normandie et étudiés par RODET (1991 a et b, 1992). Sans entrer dans les détails - car la question est complexe et controversée - on considérera l'argile à silex comme un résidu d'altération de la craie, très largement hérité et souvent remanié (cf. DEWOLF et al. 1983). Cette altération a été réalisée sous climat tropical, en grande partie avant les épandages sableux tertiaires du Bassin Parisien: dans le S de la Touraine, avant le dépôt des sables de la Brenne (Eocène moyen, cf. KLEIN, 1975). Cette couverture éluviale pénètre à l'intérieur de la craie sous forme de poches, entonnoirs et puits, parfois d'une telle densité qu'il n'y a plus entre eux que des cloisons ruinées, donnant les "*bonshommes*" de craie, bien mis en évidence par le recul des falaises du Pays de Caux (BONTE 1971, RODET 1991). Ce sont les "*racines*" du manteau d'altération, et certains puits colmatés formant des "*orgues géologiques*" ou "*pipes*" - peuvent s'enfoncer profondément: jusqu'à 53 m de profondeur à la Bretonnière (Turrelet, Seine Maritime, RODET, 1991 a, p. 58). Les soutirages, souvent répétitifs, ont affecté aussi la couverture des sables tertiaires, et même les loess, limons et formations périglaciaires (fig. 2 c).

Au point de vue hydrologique, l'argile à silex, feutrante la craie, joue un rôle ambigu: en général elle retarde l'infiltration des pluies lorsqu'elles sont fines, et détermine dans les sables et limons sus-jacents des nappes suspendues; mais au contraire de fortes averses (surtout lors des orages estivaux), peuvent donner, par glaçage des sols, des ruissellements importants vers les points d'absorption privilégiés (bétoires)...

Les formes karstiques superficielles sont caractéristiques du "*karst d'introduction*" (RODET 1991, 92) avec de nombreuses dolines absorbantes, ou bétoires, à fond souvent remblayé, mais mobile (infra, II, 3). Les infiltrations diffuses et les pertes de ruisseaux aboutissent à des réseaux organisés. Ces réseaux coexistent avec l'aquifère lié à la porosité générale de la craie, et peuvent lui servir de drain. Au voisinage des vallées, les conduits se ramifient, formant un "*delta karstique*" avec des exutoires étagés en fonction du niveau de creusement des vallées et des transgressions et régressions marines, comme le montre l'exemple du karst de Caumont étudié par RODET (1991, 92).

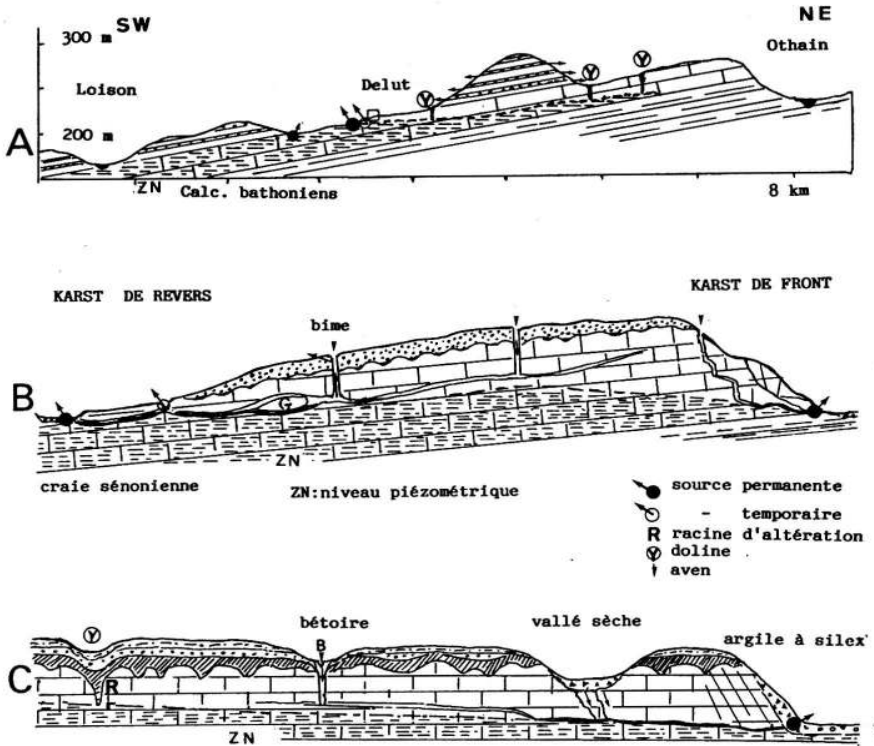


Fig. 2 - Trois types de plateaux sous couverture:
 A- de contact sous couverture argilo-gréseuse: Woèvre, d'après GAMEZ, 1992
 B - de cuesta sous couverture sabla-gréseuse, type Forêt d'Othe, d'après RODET, 1991.
 C - de craie sous argile à silex (t sables tertiaires et loess), d'après RODET, 1991.

b) Le karst du Nivernais, sous couverture d'argiles à chailles.

Il est maintenant bien connu, grâce à BRAQUE (1961) en ce qui concerne les formes superficielles, dolines et vallées sèches, et à COUTURAUD et ORANGE (1989) en ce qui concerne l'endokarst et l'hydrogéologie. Les processus karstiques sont actifs dans les calcaires jurassiques, affectés par un champ de fractures subméridiennes (dispositifs en horsts et en graben), et en général masqués par une couverture éluviale souvent composite. Il s'agit d'argiles à chailles (= rognons siliceux) résultant certainement d'altérations anciennes, particulièrement importantes sur le Bajocien, et incorporant des dépôts sableux résiduels et limons quaternaires. Cette couverture souvent épaisse, peut atteindre 10 m.

Les formes de surface sont des dépressions de suffosion dans cette formation éluviale, mais commandées par les infiltrations dans le karst; selon BRAQUE, trois types principaux peuvent être distingués: gouffres en forme de cloche, excavations cylindriques, dolines à fond mobile (fig. 3). Ces formes évoluent ensuite en dolines à fond colmate, parfois tourbeux.

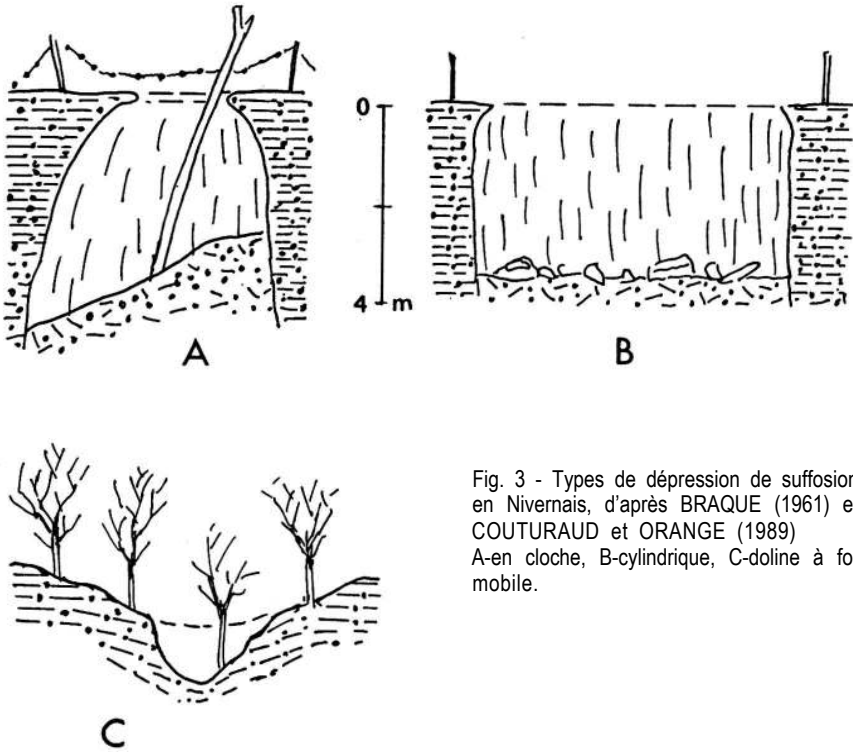


Fig. 3 - Types de dépression de suffosion en Nivernais, d'après BRAQUE (1961) et COUTURAUD et ORANGE (1989)
A-en cloche, B-cylindrique, C-doline à fond mobile.

Les cavités pénétrables sont nombreuses, et la rivière souterraine de Dordres (1910 m de développement dans le Bathonien), près de Corvol l'Orgueilleux, se situe à faible profondeur, en partie sous une vallée sèche. Mais bien des conduits, vraisemblablement anciens, sont très colmates.

On peut rapprocher du karst du Nivernais, celui des calcaires du Bathonien, au Sud de la Meuse, dans le Département des Ardennes: il se caractérise principalement par des vallonnements, les calcaires étant masqués par les dépôts résiduels, argiles de decalcification, sables wealdiens en poches, l'ensemble feutrante les irrégularités de la surface de corrosion (VOISIN, 1967). Ce cas constitue une transition vers celui des paléokarsts.

c) Karsts et paléokarsts sous couverture sidérolithique.

Sous le terme de *sidérolithique* on désigne une couverture de sables ferrugineux parfois cuirassés, très largement répandue dans le Sud du Bassin Parisien, et le Nord du Bassin d'Aquitaine, recouvrant les calcaires crayeux du Crétacé supérieur (Périgord), et localement les calcaires jurassiques. Selon le cas, cette couverture est autochtone (résultant de l'altération *in situ* de calcaires gréseux) ou plus ou moins allochtone, en provenance des décapages sur le socle du Massif central.

La principale phase d'altération se situe à la fin du Crétacé supérieur et au cours de l'Eocène: pour l'essentiel ce sont des paléokarsts plus ou moins réactives. Reprenant les travaux de FENELON (1951,1974), ils sont en ré-étude (SALOMON et ASTRUC, 1992).

Deux types peuvent être distingués.

- *Le plateau de la Forêt de la Bessède*, au Sud de la Dordogne, est le plus caractéristique du Périgord Noir. Il se caractérise par une surface très horizontale (231-244 m) seulement affectée par quelques vastes dolines très peu marquées: elle correspond à la meulière oligocène, masquant le sidérolithique, qui n'affleure que dans les vallons disséquant les bordures du plateau. Localement, des reliefs de crypte-corrosion sont exhumés, au S de Belvès (FENELON, 1951, p. 407). L'évolution actuelle est commandée par l'infiltration des eaux acidifiées à la surface du plateau (forêt de pins, maritimes, sols podzoliques, dépressions marécageuses à horizon gleifié).

Le Karst du Sarladais est le plus original, avec ses "pechs", ou mogotes évoquant un *Kuppenkarst* tropical (FENELON, 1951, 1974, NICOD et SALOMON, 1990, SALOMON et AS-TRUC 1992). Rappelons qu'il s'agit d'un système de cuesta des calcaires gréseux du Coniacien; ces derniers inégalement altérés ont donné ce type de reliefs résiduels, résultant de la crypte-altération différentielle et dégagés ensuite par déblaiement des sables (fig. 4). Le point de départ de l'évolution du relief est attesté par la dalle de meulière du plateau de Bord. Située dans un "pech", la grotte de Cougnac a connu d'abord une évolution phréatique avant le dégagement des sables. Entre les "pechs", les "plaines" sableuses ont été dégagées en plusieurs étapes depuis le Pliocène; pertes de ruisseaux et soutirages traduisent la permanence de la karstification.

Parmi les karsts et paléokarsts sous altérites, on doit mentionner encore le petit Causse de Laissac (Aveyron), caractérisé par l'existence d'une grande densité de poches et l'existence d'un réseau labyrinthique (MAIRE, 1990, p. 607), et le paléokarst du Coulon, sur le dôme urgonien d'Apt, dont l'évolution des poches remplies par les sables ocreux a fait l'objet des analyses de GUENDON (1984).

d) *Les karsts méditerranéens, sous couverture de terra rossa.*

En raison de l'intensité des phénomènes périglaciaires au cours du Quaternaire moyen et récent, cette couverture de terra-rossa n'est que très rarement continue en Languedoc et en Provence. Les bons exemples sont à rechercher dans les Pouilles, l'Istrie Rouge, le Liban littoral - c'est dans ce dernier pays qu'ont été précisés les processus par LAMOUROUX (1974). Ce n'est que très exceptionnellement que cette couverture, dans le SE de la France, est assez épaisse pour feutrer d'une manière continue les calcaires: sur le Plateau d'Albion, en Vaucluse, où mêlée de silex, elle constitue vraisemblablement le remplissage d'un paléopoljé (JULIAN et NICOD, 1989). Ailleurs, ce ne sont plus que des racines de sols fersiallitiques largement décapés, mais ces racines témoignent de l'intensité de la crypte-corrosion et des aplanissements qu'elle a permis (FABRE et NICOD, 1982); voir en particulier les excellentes coupes dues à la rectification de la R.N. 9, sur le Causse du Larzac au S de l'Hospitalet (replat de Selouesses, AMBERT 1991, 92).

e) Quelques karsts du Sud-Est de la France évoluent sous une couverture importante d'*arène doiomitique*, localement rubéfiée et généralement héritée des altérations tertiaires, comme on peut le montrer sur la partie occidentale du Causse Noir, le Larzac, et en Provence le plateau de Montrieux, etc. (AMBERT P. 1991, AMBERT P. et M. 1992 ; JULIAN et NICOD 1989). Les grands reliefs résiduels, type Montpellier le Vieux, émergent de ces altérites, provenant de la dégradation des dolomies sous-jacentes.

4 - Les karsts sous couverture alluviale

Très dispersés, ils sont peu étudiés. Les couvertures sont d'ailleurs très différentes et les conditions locales importantes.

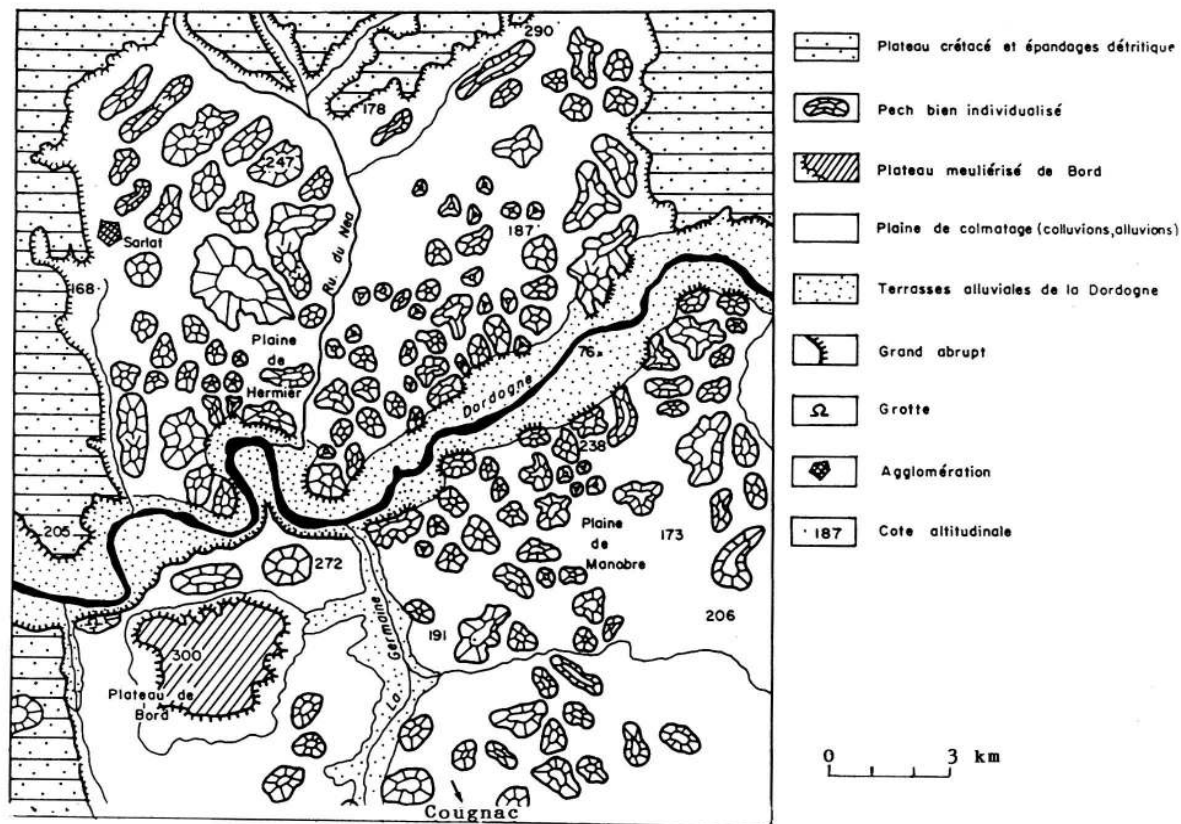


Fig. 4 - Les Pechs du Sarladais Périgord d'après SALOMON (Rapport PROCOPE 1988)

a) Sous alluvions anciennes, siliceuses et altérées, on revient pratiquement aux cas précédents. Nous avons l'exemple du karst des environs d'Ardentes, dans l'Indre (S. du Bassin Parisien). La couverture des calcaires bathoniens est constituée par la "*Formation d'Ardentes*", nappe alluviale ancienne, siliceuse, altérée, où les alluvions en provenance du socle (Limousin) incorporent les chailles provenant des plateaux bajociens immédiatement au Sud (B.R.G.M., 1975). Ce karst se caractérise par un très grand nombre de dolines évasées, et une circulation souterraine importante (S. de Théols, etc.). Un karst analogue existe au voisinage même de Bordeaux, dans les calcaires à Astéries.

b) Sous alluvions *récentes*, nous citerons les dolines, dans les terrasses situées dans les lobes convexes de méandre, dans la vallée du Lot, en aval de Cahors et au voisinage de Puy l'Evêque. Toutefois, il est possible que ce soit des formes de soutirage, liées au paléokarst des calcaires bathoniens sous-jacents (ASTRUC, in B.R.G.M., 1985). Par ailleurs, dans la vallée de l'Isère au droit du Vercors, CHARDON a signalé des dolines "kettles" dans la terrasse fluvio-glaciaire würmienne au N. de Rovon, dont l'origine est à rechercher dans la barre de calcaire urgonien de Polienas, érodée et masquée sous les alluvions. Rappelons enfin que dans la vallée de la Naturby, en amont de Draguignan, certains entonnoirs du gypse ou "clapes" apparus brutalement, comme celui de 1983, découpent à l'emporte-pièce le remblaiement holocène (JULIAN et NICOD, 1989).

5 - Les karsts sous-morainiques des hauts plateaux du Jura Central

S'il y a bien dans les Alpes quelques karsts sous-morainiques, particulièrement sur les gypses, c'est dans le Jura Central que l'on trouve les ensembles les plus caractéristiques. Deux cas ont été particulièrement étudiés.

a) *La plaine de Frasné-Bonnevaux*, située vers 820 m, et en situation de cuvette synclinale, est tapissée de formations morainiques, les unes très différenciées de la calotte glaciaire locale, les autres, plus éparses et plus anciennes provenant de la transfluence du glacier alpin (BROSSARD, 1978). Cette plaine marécageuse se présente comme une sorte de poljé d'altitude, l'écoulement étant partagé entre un cours d'eau subaérien, le Drugeon (très aménagé), affluent du Doubs et des pertes dans les emposieux (ponors) de bordure, la principale étant celle de l'Entonnoir, maintenant contrôlée, et alimentant la puissante résurgence de la Loue.

Au SE de Saint-Claude, le haut plateau des Molunes (situé vers 1200 m), étudié par NEY-ROUD (1982-84), se caractérise par de très grandes dolines (fig. 5). Ce plateau a été très largement recouvert par la calotte glaciaire qui a laissé une moraine de fond épaisse; il est possible que des noyaux de glace aient perduré dans ces dépressions à la fin de l'englacement (*dolines-kettles*, NICOD, 1990). Actuellement elles sont occupées par des tourbières drainées vers des ponors (Sous la Vye, près du hameau de la Pesse).

Les eaux des marécages et surtout celles des tourbières bombées à Sphaignes, où le pH descend jusqu'à 4 à même 3,2, d'après les observations de GAIFFE 1978, ont un pouvoir corrosif très élevé, tant dans l'épikarst que jusque dans le karst profond, puisque les eaux ne sont pas saturées aux émergences. Des cas semblables existent dans le Vercors (poljé d'Herbouilly et bordure occidentale du Val de Lans).

6 - Autre cas d'évolution sous couverture. (Tabl. 1, classes 6 et 7)

En ce qui concerne les couvertures de loess, il n'y a pas d'exemple typique en France, puisque les loess recouvrent les argiles à silex (Normandie), ou les formations éluviales et alluviales (plateaux de la Haute Saône au voisinage de Gray...). Ce type est largement représenté

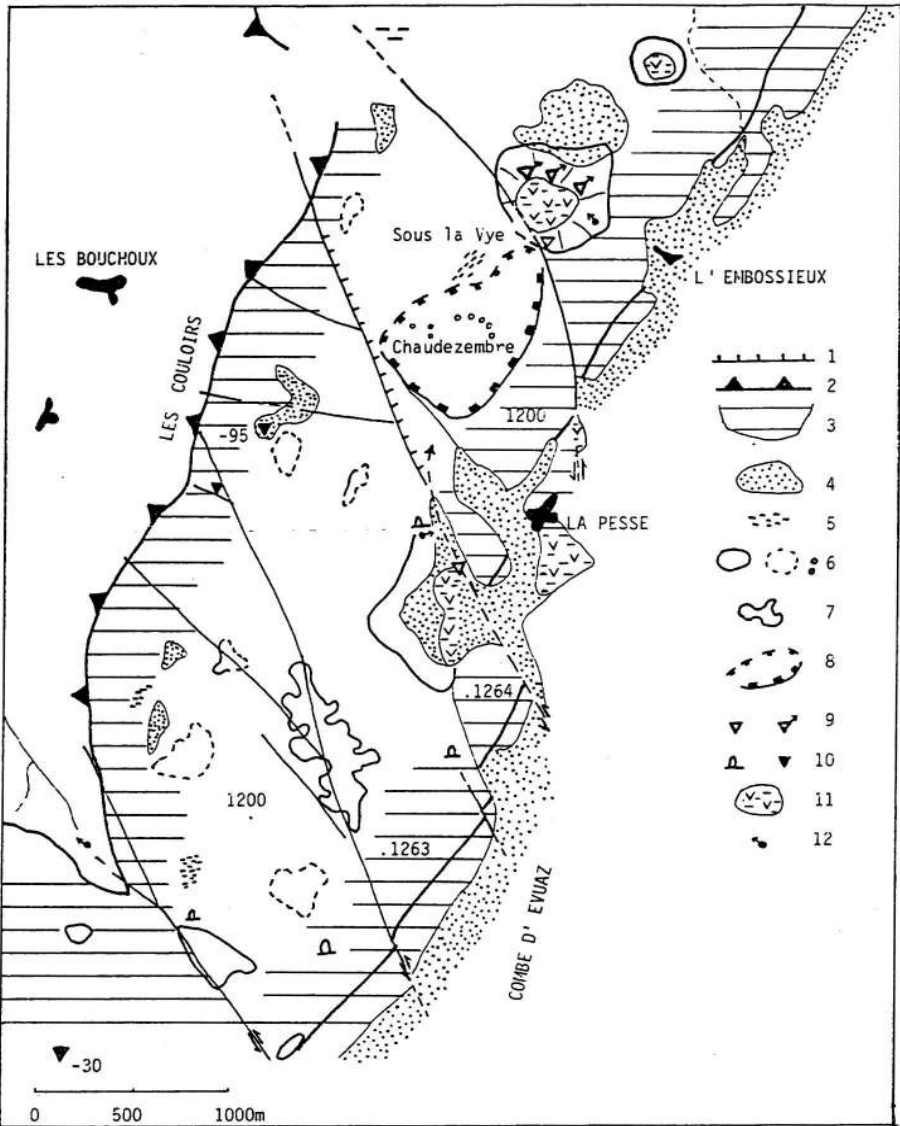


Fig. 5 - Carte géomorphologique du plateau occidental des Molunes (Jura central), d'après NEYROUD, 1982, 84, illustrant le rôle de la tectonique (failles en décrochement), de l'influence glaciaire (moraines d'un glacier de calotte) et des tourbières dans le développement des formes karstiques.

- 1 - Escarpement de faille, 2 - escarpement de chevauchement, 3 - surface d'aplanissement,
- 4 - moraines, 5 - lapiés (structuraux), 6 - doline, id. esquissée, emboîtée, 7 - ouvala, 8 - poljé,
- 9 - ponor, inversac, 10 - grotte, aven, 11 - tourbière, 12 - source.

en Pologne (plateau crayeux de Lublin, GLAZEK et al. 1982) et sur les bordures de la plaine pannonienne, en particulier au S de Belgrade (AMBERT et NICOD, 1981). Quant aux karsts évolutifs sous-dunaires, il faut chercher des exemples lointains: au Maroc, aux environs de Safi (WEISROCK et LUNSKI, 1987) et même dans l'Etat de Victoria, en Australie (LINK, 1967). Pour mémoire, on doit citer le cas des processus karstiques sous pyroclastites: ce matériel, très vite altéré, joue un rôle important dans l'évolution des poljés de l'Apennin central, comme le Piano d'Arcinazzo (RAFFY, 1977) et l'évolution des versants réglés et surfaces de corrosion en Campanie (LIPPMANN-PROVANSAL, 1987) processus étudié aussi à Santorin (POMEL, 1987).

II - FONCTIONNEMENT DES KARSTS SOUS COUVERTURE

Malgré la diversité des cas étudiés, quelques traits communs de fonctionnement doivent être dégagés.

1 - Au point de vue hydrologique

L'existence d'une couverture modifie généralement les conditions d'infiltration, mais peut intervenir aussi dans l'écoulement profond et la réponse aux exutoires.

a) La couverture argileuse ou même sableuse (présence d'horizons indurés, grésifiés etc... commande l'existence de ruissellements de surface et l'écoulement hypodermique sous forêt) qui aboutissent en des points localisés de l'épikarst, doline, "fosses" ou "bêtoires".

Toutefois des circonstances variées interviennent: dans le cas d'une couverture sablo-argileuse, comme celle des argiles de la Woëvre, l'infiltration est plus diffuse par pluies faibles et concentrée lors des orages (cf. supra I,1); par ailleurs, les aquifères suspendus (dans les sables de la Montagne de Reims, ou les loess sur argile à silex en Normandie) jouent un rôle retardateur et favorable à l'infiltration diffuse.

b) L'irrégularité de la surface morphologique, et de la surface de contact entre altérites et substrat carbonaté induit une irrégularité de la surface piézométrique (BONACCI, 1987, p. 23).

c) Le débouchage brutal de conduits peut contribuer aux phénomènes d'artésianisme au voisinage du passage d'un écoulement libre à une nappe captive (Delut, "bimes" du Pays d'Othe).

d) Mais, dans la plupart des cas, la rétention des eaux dans les formations de couverture et à différents niveaux du karst, en raison de l'obstruction plus ou moins complète des conduits par les insolubles (sables et argiles) a pour effet de tamponner la réponse aux précipitations. A tel point que dans certains cas, l'analyse des courbes de récession peut donner l'illusion d'un milieu non-karstique (dans certaines sources du Nivernais, COUTURAUD et ORANGE, 1987). Le second bassin karstique de France, après celui de la Fontaine de Vaucluse, est celui de la Touvre, près d'Angoulême (500 km², débit moyen 13 m³/s) : cette source est alimentée conjointement par les infiltrations sur l'impluvium des calcaires jurassiques, les pertes de deux cours d'eau en provenance du Limousin cristallin (la Tardoire et le Bandiat) et l'aquifère des alluvions de ces deux vallées, sortes de paléo-poljés remblayés (ENJALBERT, 1947); les analyses hydrochimiques (BLAVOUX et al., 1987) confirment le rôle des pertes diffuses.

2 - Au point de vue de l'évolution géomorphologique

La présence d'une couverture argileuse ou sableuse modifie les conditions d'évolution au niveau de l'épikarst ou dans l'endokarst.

a) Dans l'épikarst, elle entretient les processus de crypte-corrosion (FABRE et NICOD, 1982) le développement des poches et "pipes" où migrent les sédiments superficiels, et joue

le rôle de "compresse". Nous en avons donné de nombreux exemples: argile à silex et sables tertiaires au contact de la craie, sidérolithique, terra-rossa, arène dolomitique. Cette évolution est ancienne, remontant au moins au début du Tertiaire en ce qui concerne l'argile à silex du Sud du Bassin Parisien (KLEIN, 1975) ou le sidérolithique du Périgord; elle a été réactivée à maintes époques, et les paléokarsts se trouvent ré-incorporés dans la karstification actuelle.

b) Dans l'endokarst, on a noté l'importance des colmatages argileux (bordure de la Woèvre) et sableux (Rivière souterraine de la Guinand en Pays d'Othe). Ces colmatages peuvent induire des modifications importantes dans la disposition des réseaux souterrains, et favoriser des écoulements à faible profondeur aux dépens des conduits noyés colmatés.

c) La couverture, le plus souvent siliceuse (argile à silex, sables..) sous couvert forestier (spécialement de conifères) induit de sols podzoliques, même à basse altitude en Aquitaine (Forêt de la Bessède). Les difficultés de drainage, en particulier dans les dolines et dépressions diverses, entraînent l'apparition d'horizons gleyfiés, parfois temporaires ("stagnogley vernal" de GAIFFE, 1988). Et surtout des tourbières peuvent se développer, non seulement sur les argiles morainiques du Haut-Jura, mais même à basse altitude, sur les plateaux du Nivernais ou du Périgord. L'ensemble de ces conditions explique l'introduction d'eau agressive dans le karst, favorable à son évolution active. RODET (1991) signale la minéralisation faible de la source de Fontaine Pleureuse, dans la Montagne de Reims; TAC=20°8 contre 26 à 27° aux autres sources du secteur, et, d'après BAKALOWICZ 1973, 16 à 21°5 à la Rivière souterraine des Fourneaux, en Pays d'Othe, avec un pH entre 6,6 et 7. Ces caractères corroborent le potentiel d'agressivité des eaux infiltrées à partir des couvertures sableuses.

d) Sur les plateaux karstiques sous couverture, le taux d'érosion ne s'exprime pas par le seul transfert des carbonates: on doit prendre en compte la somme du transit des fines (qui intervient en période de crue) par le réseau karstique et de la dissolution des carbonates. Autrement dit, il faut des mesures de la turbidité (qui permettent de prendre en compte la dégradation spécifique), des teneurs et des débits. Seul GAMEZ (1992) grâce à un appareillage adéquat, a réalisé ce type de mesures dans le bassin versant de la Damusse. Les valeurs obtenues (moyenne sur 6 ans) montrent que la dégradation spécifique représente plus du quart de l'érosion totale (tabl. II). Et encore s'agit-il d'un bassin en grande partie forestier; des mesures pendant une seule année ont montré que le taux d'érosion est maximal dans les "rondvaux" mis en culture.

Tableau II - Taux d'érosion dans le bassin-versant de la Damusse (Station de Delut) d'après GAMEZ (1992, p. 352 et 371)

Surface du b.v.	11,5 km ²		
Période de mesure	84/85 à 89/90		
P moyenne	858 mm.		
ETr moyenne	470 mm.		
Écoulement moyen	370 mm.		
Taux de dégradation spécif. (densité=2,6)	46 t/km ² /an	→	17,7 m ³ /km ² /an ou mm/10 ³ ans
Taux de dissolution spécif.			
année humide 87/88	60 m ³ /km ²		†
année sèche 89-90	30 m ³ /km ²		↓
moyenne (6 ans)	44,4 m ³ /km ² /an		44,4 -id-
Taux d'érosion total		→	62,1 -id-

On pressent combien les activités humaines, en modifiant la couverture végétale, peuvent intervenir dans le fonctionnement hydrologique du karst sous-jacent et son évolution géomorphologique. Mais on manque de mesures comparatives, permettant de saisir les différences d'une région à l'autre et le jeu des nombreux facteurs. Et en ce qui concerne l'évolution des dolines sous important remplissage, incluant dépôts résiduels et loess, on n'a en France aucune mesure comparable à celles réalisées par ZAMBO (1991) dans le fond d'une doline du plateau karstique d'Aggtelek, en Hongrie.

3 - Au point de vue géotechnique

De très nombreuses formes de vallonements et de dépressions ont été recensées. Elles résultent des processus de tassement et de soutirage (sinking) dans la couverture meuble au-dessus des fentes, cheminées d'infiltration, "pipes" et poches des "racines" d'altération dans le karst sous-jacent. La plupart du temps, ce sont, surtout dans les labours et les prairies, des formes quasi-effacées, d'où les confusions possibles avec les trous d'obus en France de l'Est, et les anciennes marnières en Normandie.

Plus marquées sont les dolines absorbantes ou "béfoires" caractéristiques du "*karst d'introduction*" (RODET, 1991-92). Certaines sont à réouverture périodique.

Les processus de suffosion, liés à l'absorption du matériel meuble en profondeur, entraînent l'apparition de dépressions superficielles en cloche ou cylindriques, de types décrits en Nivernais (fig. 3 A et B supra) et observées aussi en Saône-et-Loire ("*follefières*" du Brionnais, LETOURNEUR, 1964); divers effondrements analogues se sont produits dans l'argile à silex dans le Nord de la Touraine et l'Orléanais (COUDERC, 1991). Plus rares sont les cas où par suite de "collapse", on peut atteindre le réseau karstique sous-jacent, comme dans le cas du Gouffre Denizot, près de Rougemontiers (Eure), dégagé brutalement à la suite de travaux effectués au bulldozer (fig. 6 A, d'après RODET, 1991). Ces phénomènes d'ouverture de fonds de dépressions colmatés peuvent être multiples, après de fortes pluies qui déstabilisent les bouchons argileux, spécialement dans les causses du Quercy (MOURET, 1984). Et on en trouve des exemples multiples dans les karsts similaires américains: ainsi dans le Minnesota, près d'Utica, où le karst des dolomies ordoviciennes est masqué par les altérites tertiaires, les "*hills*" anciens et les loess, on a pu réaliser une statistique des 535 cas recensés et prédire leur occurrence par observation des dépressions colmatées traduisant en surface la présence de "*pipes*" (DAGLEISH et ALEXANDER, 1984).

Certains de ces phénomènes ont une origine anthropique. Ainsi RODET (1991, p. 124) étudie le cas du village de Vitot, près de Neubourg (Eure) où de nombreux désordres et dégâts sont constatés dans les rues, les clôtures et les murs des maisons: c'est la conséquence de la descente de l'argile à silex dans les fentes et cheminées recoupées par les chambres des carrières souterraines (fig. 6 B). Des pompages prolongés dans les aquifères peuvent induire aussi des désordres. Et ces derniers deviennent plus nombreux dans les zones urbanisées, comme on l'a montré en Pennsylvanie (WHITE et al., 1984).

CONCLUSION

Les exemples étudiés démontrent tout l'intérêt des recherches dans les karsts sous couverture, qui ont une grande extension dans les pays tempérés (cf. JAKUCS, 1977, carte fig. 40). Si les formes sont feutrées, elles ne sont pas moins évolutives, et les problèmes de l'introduction des polluants dans le karst y nécessitent des études locales minutieuses, du type de celle réalisée par SAURO et al. 1991, sur le plateau d'Asiago (Préalpes de Vénétie).

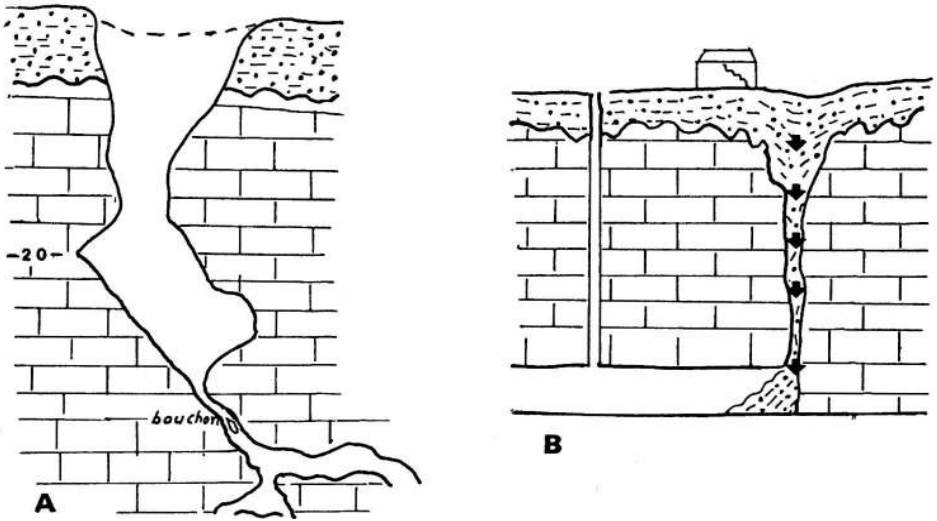


Fig. 6 - Deux types de phénomènes de suffosion, d'après RODET, 1991:

A - par dégagement subit d'un bouchon argileux, Gouffre Denizot, Rougemontiers (Eure)

B - désordres dans le village d'Ytot, sur les "pipes" d'argile à silex, causés par l'exploitation de la craie en souterrain.

Par ailleurs, il est facile de montrer l'analogie entre l'évolution des plateaux karstiques sous couverture, en zone tempérée, et celle de maints karsts tropicaux, sous couverture de sables et d'altérites - comme la Floride et certains karsts de l'Ouest de Madagascar. Il y a d'ailleurs plus qu'une convergence de formes, puisque dans bien des cas, l'héritage tropical peut être reconnu (NICOD et SALOMON, 1990, MAIRE, 1990, etc.).

REFERENCES

- ALONSO-RAMIREZ J., 1990 - Sinthesis geomorfológica de Las Sierras de Encia y Urbasa ; in BARANDIARAN I. et al. : *"Los Grupos humanos de la Prehistoria de Encia-Urbasa"*, (2), 21-39.
- AMBERT P., 1991 - L'évolution géomorphologique du Languedoc Central depuis le Néogène ; Thèse d'Etat, Aix-en-P., 2 vol.
- AMBERT P. ET M., 1992 - Les mégalapiés dolomitiques des Grands Causses...; *Z. Geomorph.* NE, Suppl. Bd. 85, pp. 73-87.
- AMBERT P. et NICOD J., 1981 - Quelques karsts de Serbie de l'Est...; *Rev. de Géog. de l'Est*, XXI-4, 235-249.
- BLAVOUX B., MUDRY J. et ROUILLER D., 1988 - Identification des eaux d'infiltration... Touvre, *Ann. Sc. Besançon*, 6, 1, 83-90.
- BONACCI O., 1987 - Karst Hydrology; Springer Series in physical Environment, Springer, 184 p.
- BONTE A., 1971 - Poches de dissolution et argile résiduelle; *Ann. Soc. géol. Nord (Lille)* XCI, 39-46.
- BOSSARD Th., 1978 - Carte géomorphologique de la région de Bonnevaux-Frasne (Doubs); *Centre Univ. Etudes regionales, Besançon*, n° 2, 51-66.
- BRAQUE R., 1961 - Le modelé des plateaux nivernais; *Bull. Ass. Géog. Fr.*, n/n° 299-300, p. 110-128.

- B.R.G.M. (Bureau des Recherches géol. et minières), 1967 - Carte hydrogéologique du Bassin de Paris au 1/500 000e.
- B.R.G.M., 1970 -Atlas des Eaux Souterraines.
- B.R.G.M., 1980 - Carte Hydrogéologique de la France au 1/1 500 000.
- B.R.G.M., 1975 Carte géol. de la France au 1/50 000, n° 571, ARDENTES.
- B.R.G.M., 1985 id., PUY L'EVEQUE, par J.G. ASTRUC.
- CALBA F., CHARRIERE G., CONRAD G., LEFEBVRE D. et RODET J., 1979 - Relations entre le développement du karst de la Craie, la dynamique et la qualité des eaux souterraines du Pays de Caux ; Bull. soc. géol. Normandie, LXVI, 4, 45-68.
- COLIN G. et GODARD A., 1962 Les dépressions fermées en Lorraine ; Rev. géog. de l'Est, II, 3, 233-261.
- COUDERC J.M., 1991 -Contribution à l'étude des cavités naturelles dans les argiles ; *Norois*, n° 151, p. 309-314.
- COUTURAUD A. et ORANGE A., 1989 - Le Karst nivernais, aperçu géomorphologique et hydrologique ; *Karstologia*, n° 14, 23-30.
- DAGLEISH J. et ALEXANDER A.C., 1984 Sinkholes distribution in Winona Cy, Minnesota; in BECK, ed. "*Sinkholes, their Geology, engineering and environmental impact*", Balkema (Rotterdam), 79-85.
- DEWOLF Y., MATHIEU C. et CALLOT G., 1983 Les argiles à silex du Bassin de Paris ; Bull. Soc. géol. Fr. (7) XXV-1, 25. 29.
- ENJALBERT M., 1947 - Le karst de la Rochefoucault (Charente); *Ann. de Géog.*, n° 302, 104-124.
- FABRE G. et NICOD J., 1982 Modalités et rôle de la corrosion crypte-karstique dans les karsts méditerranéens et tropicaux; *Z. Geomorph. N.F.*, 209-224.
- FENELON P., 1951 - Le Périgord, étude morphologique; Thèse Paris, 526 p.
- FENELON P., 1974 Karsts de type tropical sous climat tempéré; *Mémoires et Dot. C.N.R.S.*, vol. 15, Phénomènes karstiques II, p. 95-103.
- FORD D. et WILLIAMS P., 1989 Karst Geomorphology and Hydrology; Unwin Hyman (London), 601 p.
- GAIFFE M., 1988 - Observations pédologiques dans les zones humides de Bonnevaux-Frasne ; *Centre Univ. Etudes régionales, Besançon*, n° 2, 187-205.
- GAMEZ P., 1992 - Hydrologie et karstologie du bassin du Loison (Lorraine septentrionale); Thèse Metz, 397 p. multigr.
- GAMEZ P. et HALL F., 1991 L'Etang d'Amel en Woëvre sept. ; Moseila, CEGUM, Metz, t. XVIII.
- GAMEZ P. et SARY M., 1979 - Morphogénèse et karstogénèse en Woëvre sept., l'interfluve Loison-Othain; Moseila (id.), t. IX, 3-76.
- GLAZEK J., GRADZINSKI R. et PULINA M., 1982 - Karst and Caves in Poland; *Kras i Speleologia*, Sosnowiec, t.4, XIII, 9-20.
- GUENDON J.L., 1982 - Le paléokarst du Coulon, altération d'une série détritico siliceuse sur substratum carbonaté... *Mém. et Dot. C.N.R.S.*; Phénomènes karstiques III, 133-159.
- JAKUCS L. 1977 Morphogenetics of karst Regions; A. HILGER (Bristol), 284 p.
- JULIAN M. et NICOD J., 1989 Les karsts des Alpes du Sud et de la Provence; *Z. Geomorph. Suppl. Bd.* 75, 1-48.
- KLEIN C., 1975 - Massif Armoricain et Bassin Parisien; (Thèse d'Etat Paris), *Assoc. Publ. Univ. Strasbourg*, t. XII, 3 vol.
- LAMOUROUX M. 1974 Le karst libanais, sols de karst et altérations des roches carbonatées; *Mém. et Dot. C.N.R.S.*, *Phénomènes karstiques II*, 15-26.
- LETOURNEUR J., 1964 Sur les entonnoirs d'ablation les "Folletières du Brionnais"; (Saône et Loire) ; Bull. *Serv. Carte géol. Fr* ; 45-50.
- LINK A.G. 1967 Late Pleistocene-holocene climatic fluctuation... ; *Z. Geomorph. N.F.* 11,2, 117-145.
- LIPPmann-PROVANSAL M., 1987 - L'Apennin Campanien méridional, étude géomorph.; Thèse Etat Aix-en-Provence, 769 p, multigr.
- MAIRE R., 1990 - La haute Montagne calcaire (Thèse Etat Nice), *Karstologia Mémoires* n° 3, 750 p.
- MEGNIEN C., 1980 -Synthèse géol. du Bassin de Paris, *Mém. B.R.G.M.* 101 et 102.
- MOURET C., 1984 Les effondrements en milieu karstique, un risque naturel... ; *Colloque de Caen "Mouvements de terrains"*, *Dot. B.R.G.M.* n° 83, 253-271.

- NEYROUD M., 1984 - Macroformes karstiques et structures anticlinales sur un haut plateau jurassien, le pays molunois méridional; *Karstologia* n° 3, 215-238.
- NICOD J., 1984 Instabilité des dépressions karstiques; Colloque de Caen "Mouvements de terrains"; *Mém. B.R.G.M.* n° 83, 273-278.
- NICOD J. et SALOMON J.N., 1990 Les Mogotes, des reliefs karstiques structuraux, et/ou hérités; *Rev. Géomorph. dynamique*.
- POMEL S., 1987 Les sols et les systèmes volcano carbonatés... à Santorin et à La Réunion; *Trav. U.A. 903 du C.N.R.S.*, Aix.
- RAFFY J., 1977 Le Karst d'Italie centrale; *Noröis*, n° 95 bis, 133-147.
- RODET J., 1991 - Les karsts de la Craie, étude comparative; Thèse Etat Paris IV, reprise dans RODET J., 1992.
- RODET J., 1991 - La Craie, roche carbonatée poreuse et son karst; *Karstologia* n° 18, 13-18.
- RODET J., 1992 - La Craie et ses Karsts; *Centre Normand d'Etude du Karst*, 562 p.
- SALOMON J.N. et ASTRUC J.G. 1992 Un exemple en zone tempérée d'un paléokarst tropical exhumé: la cuvette du Sarladais; in "Karsts et évolution climatique", P.U.F. Bordeaux.
- SAURO U., MARTELLI G.V. et FRIGO G. 1991 - Karst Environment and human impact of the Sette Commission... *Proceed internat. Conference Environmental Changes in Karst*, Padova, 262-278.
- TRICART J. et CAILLEUX Z., 1967 Le Modelé des régions périglaciaires, S.E.D.E.S., Paris, 512 p.
- UGARTE ELORZA F.M., 1989 - Geomorfologia de las unidades karsticas situadas en los montes vascos; in *El Karst en España*, Monogr. 4 SEG (Madrid), 121-130.
- VIERS G., 1977 Une énigme morphologique, les limons d'Isturits (Pyrénées atlantiques); *Noröis*, n° 95 bis - 109-113.
- VOISIN L., 1967 - Les vallonnements dans le Bathonien moyen des Ardennes; *Bull. Assoc. Geogr. Fr.*, n° 357-58, 69-73.
- WEISROCK A. et LUNSKI S., 1987 - Le Karst pliocène de la région de Safi (Maroc atlantique); *Karstologia* n° 9, 31-36.
- WHITE E., ARON G. et WHITE W.B., 1984 The influence of urbanization on sinkhole development in Central Pennsylvania... ; in BECK ed. "Sinkholes, their Geology Engineering and environmental Impact", Balkema (Rotterdam), 275-281.
- ZAMBO L., 1991 The Soil effect on Karst Development; *Proceed. Internat. Conference Environmental Changes in Karst*, Padova, Quad. n° 13, 333-339.