

4 • Que se passe t-il aux limites de périodes géologiques ?

Fin de l'ère primaire : le grand chambardement

La fin de l'ère primaire correspond à un événement tout à fait extraordinaire de l'histoire de la vie sur la Terre. En effet, c'est à ce moment que se produit la plus catastrophique des extinctions avec la disparition de plus de 90% des espèces animales et végétales, aussi bien dans les mers que sur terre, soit les trois-quarts des grandes familles existantes (voir Erwin, 2006 et bibliographie associée). Née il y a plus de trois milliards huit cent millions d'années, la vie était d'abord présente sous la forme très primitive de simples cellules isolées capables de se multiplier, monde de microbes, de bactéries et d'algues unicellulaires. Peu avant le début de l'ère primaire, il y a 540 millions d'années, ces formes de vie se sont développées, sont devenues complexes, puis ont formé les embranchements que nous connaissons, et sont sorties des mers pour conquérir les terres émergées, les continents encore vides. Mais, à la fin de l'ère primaire, en l'espace de quelques milliers d'années, peut-être moins, un équilibre a été rompu et la majorité des espèces a disparu.

Ces événements se sont déroulés alors que la Terre était encore loin de connaître sa physionomie actuelle. À la place de nos six continents se trouvait un seul bloc émergé, la Pangée, entouré d'un vaste océan, Panthalassa. Et au cœur de ce continent unique s'étalait une mer qui porte le nom de Téthys, divisée en deux branches, "paléo" pour l'ancienne du début de l'ère primaire et "néo" pour la plus récente, vers la fin de cette ère.

Pour comprendre les phénomènes qui se sont passés durant cette période, de nombreuses investigations ont été menées, particulièrement dans les régions où cet intervalle est enregistré en continu dans les couches géologiques, et observable dans de bonnes conditions. C'est en particulier sur le pourtour de cette mer néo-Téthys disparue, que se trouvent les strates recherchées. Comme beaucoup d'autres, nous les avons étudiées en Italie du Nord et Slovénie, en Albanie et en Grèce, en Turquie, en Iran, en Oman, au Pakistan, en Himalaya indien et tibétain, ainsi qu'en Chine du Sud où ces couches affleurent largement. C'est là, dans une des carrières de Meishan à l'est de Nankin que la

commission internationale de stratigraphie a désigné en 2000 le stratotype de la limite Permien-Trias qui correspond à un étalon de la limite entre les ères primaire et secondaire. Pour célébrer l'honneur de détenir un tel étalon géologique, les scientifiques chinois ont mis sur pied en 2003 une cérémonie grandiose et ont ouvert à cet endroit un vaste géoparc (fig. 4-1).

Des indices cachés dans les roches, l'enquête des géologues

Les premiers indices sont les fossiles, abondants et diversifiés sous la couche-limite qui marque l'extinction et pratiquement absents au-dessus. Ainsi, à Meishan, les chercheurs chinois avec Jin et al., en 2000, ont dénombré plus de 330 espèces fossiles dans les 2 ou 3 couches qui précèdent l'extinction et à peine une dizaine au-dessus. Que s'est-il passé ?

L'enquête paléontologique montre qu'il y a eu disparition des organismes complexes à squelette calcaire, ceux-là même qui participent aux constructions récifales, ceci au niveau de la couche-limite, puis remplacement par d'autres organismes simples, microscopiques,

Dossier



Fig. 4-1 – Le géoparc de la carrière de Changhsing près de Meishan (Chine du sud). Les escaliers verticaux (à droite en haut) permettent d'examiner en détail les couches-étalon qui définissent la grande extinction et la limite entre l'ère primaire et l'ère secondaire.

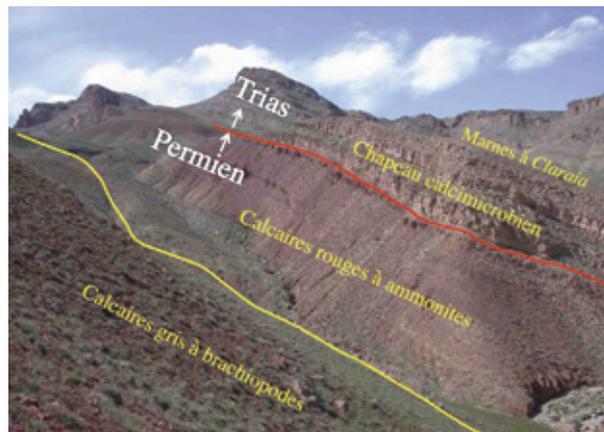


Fig. 4-2 – Le profil de Julfa (Kuh e ali Bashi, nord-ouest de l'Iran) est l'un des plus complets et des mieux calibrés grâce à la présence d'ammonioïdés et de conodontes. La grande extinction est enregistrée au sommet des calcaires rouges, dans les argiles rouges-limite. Au-dessus, les calcaires gris ont une origine algo-microbienne.

algaires ou microbiens qui témoignent d'un retour anachronique aux conditions prévalant plusieurs centaines de millions d'années auparavant. Nous avons illustré cette enquête (Baud *et al.*, 1997, 2005 et 2007) par de nombreux exemples des couches-limite en Turquie et en Iran (fig. 4-2 : le profil de Julfa, Iran du nord-ouest) et nous poursuivons actuellement nos recherches en Chine du Sud.

Les systèmes de production des roches calcaires biogéniques passent soudainement d'une usine à débris de coquilles (matériel squelettique) à une usine algo-microbienne, d'où la formation chapeau calci-microbien qui suit l'extinction dans les couches de la Téthys intertropicale, tel que nous l'avons illustré en Turquie méridionale (Baud *et al.*, 2005). Les communautés récifales de l'ère primaire ont complètement disparu. Dans l'hémisphère nord, le long de l'océan Panthalassa, les systèmes de production de silice biogénique (radiolaires, spicules d'éponges siliceuses) s'effondrent dans l'intervalle des couches-limite pour laisser place à un afflux de sédiments détritiques terrigènes qui dilue ou fait disparaître les sédiments biogéniques ainsi que cela a été montré avec B. Beauchamp en 2002. Les organismes qui résistent bien ou qui profitent de l'extinction sont les ammonioïdés,

ancêtres des ammonites, ainsi que les bivalves et les gastéropodes, et, parmi les microfossiles, les conodontes. Dans leur article de 2009 "Good Genes and Good Luck: Ammonoid Diversity and the End-Permian Mass Extinction", A. Brayard et ses collègues montrent que le groupe des ammonioïdés, présent avec seulement 3 genres survivants à la grande extinction, a un taux de radiation bien supérieur aux autres organismes squelettiques et retrouve une grande diversité en moins d'un million d'années. Outil de biochronologie, en raison de leur taux d'évolution très rapide comme les ammonioïdés, les organismes porteurs de conodontes sont relativement moins affectés par l'extinction et se diversifient très rapidement dès le début du Trias comme l'indique Mike Orchard en 2006.

Une autre enquête est menée par les géochimistes qui analysent les roches sédimentaires au-dessous et au-dessus de la couche-limite. Quels types d'analyse vont-ils effectuer et quelles sont leurs constatations ? En plus d'analyses chimiques classiques des éléments majeurs et mineurs de la roche, ce sont les isotopes stables du carbone, du strontium, du soufre et de l'oxygène qui vont être leur sujet de prédilection. Et là, surprise, la construction des courbes isotopiques des trois premiers éléments, à partir de roches

marines prises dans chaque période géologique des 600 derniers millions d'années, nous montre des variations d'une amplitude unique au passage des ères primaire à secondaire (fig. 4-3). Ces variations sont le témoin de perturbations considérables du chimisme des océans, juste avant, pendant et après la grande extinction. En particulier, dans les couches qui précèdent et qui suivent la grande extinction, nous avons montré dans des travaux pionniers (Baud *et al.*, 1989) qu'il existe une chute considérable (4-6 ‰) de la quantité de carbone lourd (^{13}C) piégé dans le carbonate marin et dans la

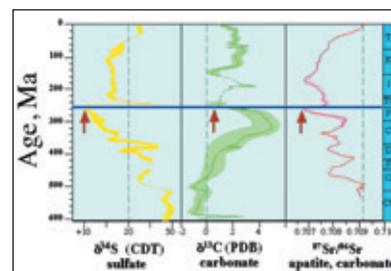


Fig. 4-3 – Courbes des isotopes stables du soufre, du carbone et du strontium, des sédiments marins au cours du Phanérozoïque (les 600 derniers millions d'années). C'est au passage de l'ère primaire à l'ère secondaire, il y a 252 millions d'années, que l'on trouve les variations les plus importantes. Elles enregistrent des perturbations considérables du chimisme des océans d'alors (d'après Holser *et al.*, 1984, modifié).

matière organique. Ces travaux isotopiques sur le carbone ont été ensuite repris à une vaste échelle et servent comme outil, en l'absence de fossiles dateurs, pour les corrélations géologiques. À partir de profils de Turquie, d'Iran et d'Oman, un essai sur les corrélations de haute précision, basé sur la courbe isotopique du carbone, a été présenté en 2010 par l'équipe de S. Richo.

Un autre sujet de prédilection concerne l'étude des isotopes radioactifs de longue durée qui permet des datations absolues, tels ceux de l'uranium et de l'argon analysés sur des zircons ou des feldspaths d'origine volcanique. L'âge de l'extinction a été calibré par Shu-zhong Shen et son équipe en 2011, ceci sur zircon par la méthode Uranium-Plomb, dans la coupe de référence de Meishan. Cette nouvelle calibration a donné un âge de $252,28 \pm 0,08$ Ma, ce qui rajeunit de 0,32 Ma l'âge déjà précis à l'échelle géologique donné en 2004 par Mundil et ses collègues. C'est l'âge d'un niveau de cendres d'un puissant volcanisme explosif, déposé dans la mer qui recouvrait alors la Chine du Sud, juste au-dessus du niveau d'extinction. Peu auparavant, et daté par les isotopes de l'argon, un autre volcanisme plus basique commence à relâcher des kilomètres d'épaisseur de basaltes sur toute la Sibérie occidentale, fontaines de laves avec des dizaines de points d'éruption comme l'illustre avec son équipe Reichow en 2009.

La matière organique emprisonnée dans les roches fait aussi l'objet de recherches détaillées : après l'extinction, les unicellulaires deviennent des constituants majeurs. Dans les terrains sédimentaires de la fin de l'ère primaire du Grand-Nord canadien, des chercheurs emmenés par Steve Grasby ont découvert en 2011, juste au-dessous des couches qui marquent l'extinction, des niveaux riches en cendres résultant de la combustion de charbon terrestre. Vastes incendies qui ont fait disparaître la flore des continents et/ou incendie

de dépôts de charbons pris dans les laves volcaniques, ce sont également les conclusions d'autres chercheurs qui ont travaillé en Chine du Sud. Dans un article publié en 2011, la découverte d'abondants filaments organiques attribués à des cryptogames parasites dans les couches limites serait pour Henk Vissler et ses associés, la preuve d'une attaque virulente du couvert végétal affaibli de la fin de l'ère primaire.

Les hypothèses

Causes extra-terrestres

Dans le cas de la disparition des dinosaures, à la fin de l'ère secondaire, les scientifiques sont presque tous d'accord pour incriminer une cause extra-terrestre, en l'occurrence la chute d'une météorite. Mais il n'en va pas de même pour le grand chambardement de la fin de l'ère primaire. Certains scientifiques se sont mis à la recherche du cratère d'une grosse météorite qui aurait été la cause principale de cette extinction, mais les preuves au bénéfice de cette hypothèse sont complètement absentes. Il n'y a en effet ni cratère daté de la période d'extinction, ni traces de métaux "extra-terrestres" comme l'iridium, dans les couches témoins de celle-ci. D'autres scientifiques préfèrent imaginer la rencontre entre la Terre et une comète. Cette dernière, formée principalement de gaz solidifié, aurait déposé dans l'atmosphère une grande quantité de gaz et de poussière en suspension, ce qui aurait provoqué un changement climatique catastrophique avec un "hiver artificiel", et donc l'extinction qui nous préoccupe. Une fois encore, aucune preuve évidente et le grand chambardement n'est donc très probablement pas dû à des causes externes.

Causes internes : cette hypothèse privilégie une activité interne à notre globe

Un abaissement du niveau marin pourrait être l'une des causes : la limite naturelle entre le Permien et le Trias correspond à un maximum de régres-

sion, c'est-à-dire à une migration très au large des recouvrements (*onlap*) côtiers qui a pour résultat la disparition de la plus grande partie des habitats marins de la plate-forme continentale. Dans un article de 2009, Yuko Isozaki fait le lien entre le redémarrage des inversions magnétiques (fin de la période Kiaman il y a 265 Ma), les remontées mantelliques (*plume*) avec le volcanisme lié et les extinctions de la fin du Permien dont la dernière, le grand chambardement avec ses perturbations climatiques (scénario d'hiver volcanique), son extinction catastrophique suivi d'un réchauffement climatique à long terme. Ainsi, le volcanisme des gigantesques épanchements sibériens et ses extrusions gazeuses, avec le volcanisme explosif de Chine du Sud, seraient une des causes de l'affaiblissement dramatique des écosystèmes et de l'extinction finipermienne, telles que le montre en 2009, respectivement Svenson et Reichow avec leurs équipes.

Causes externes

Une troisième hypothèse est celle d'un océan stratifié au Permien supérieur avec anoxie dans les couches profondes et prolifération de bactéries liées au soufre. Des pulsations de la zone euxinique avec l'introduction de sulfure d'hydrogène toxique dans la partie superficielle de l'océan suivi de relâchement dans l'atmosphère et/ou le renversement de cette stratification seraient pour Marengo dans son article de 2005 et Shu-zhong Shen et son équipe en 2011, parmi les mécanismes tueurs causes de l'extinction en masse.

Développement actuel et futur des études sur la grande extinction

Elles s'orientent vers la calibration temporelle des variations géochimiques : par exemple, Rampino et collaborateurs montrent en 1999 que la chute de 4 à 6 pour mille du $\delta^{13}\text{C}$ au passage Permien-Trias s'est produite dans un intervalle inférieur à

40 000 ans, alors qu'en 2011, pour Shen et son équipe, cette durée estimée est plus proche de 20 000 ans.

De nouveaux isotopes stables sont en outre à l'étude. Les variations de l'isotope lourd du calcium (^{44}Ca) dans les carbonates marins au passage Permien-Trias ont fait l'objet d'études préliminaires en 2010 par Payne et collaborateurs, et une excursion négative a été constatée au passage Permien-Trias dans les calcaires du grand banc de Guizhou en Chine du Sud, avec pour corollaire l'hypothèse d'une acidification des eaux marines. Les variations du rapport isotopique du molybdène ($^{98/95}\text{Mo}$) ont également été analysées par Silva-Tamayo dans une étude préliminaire présentée en 2009 par une équipe internationale. Les valeurs très faibles du rapport isotopique seraient le signe d'eaux anoxiques qui séquestrent le molybdène lourd. Des études, publiées en 2008 par Ehrenberg et collaborateurs, ont montré une chute importante de la teneur en uranium dans les carbonates marins au passage Permien-Trias. Comme il y a séquestration de l'uranium lourd dans les sédiments anoxiques, l'analyse du rapport $^{238/235}\text{U}$ donne des indications sur l'évolution des paléoenvironnements. Les études de Brenneka publiées en 2011 et faites en Chine du Sud sur le profil de Dawen, indiquent un abaissement brusque de la quantité d'uranium lourd juste avant l'horizon d'extinction. Ces auteurs en déduisent une large expansion de l'anoxie sur les marges de l'océan. Les terres rares font également l'objet d'investigation. L'enrichissement en cérium par rapport aux autres terres rares est un indicateur d'anoxie. En ce qui concerne le rhénium, les rapports $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$, étudiés par Georgiev et son équipe dans les couches limites de schistes argileux noirs du Groenland oriental, montrent des enrichissements extrêmes qui seraient la preuve d'un fort réchauffement des eaux océaniques, de leur acidification et également de l'expansion

de l'anoxie sur les marges de l'océan. Une équipe canadienne emmenée par Hamed Sanei vient de découvrir, dans les couches limites du Grand-Nord (îles d'Ellesmere et d'Axel Heiberg), des concentrations anormales de mercure (Hg), poison violent qui aurait été relâché dans l'atmosphère par les éruptions volcaniques de Sibérie

Conclusions

Actuellement, plus que l'une ou l'autre des hypothèses prises isolément, c'est la conjonction d'événements successifs qui permet d'expliquer le grand bouleversement. D'abord il y a un abaissement progressif du niveau marin, ce qui libère le méthane emprisonné sur les marges océaniques et provoque le premier réchauffement. Celui-ci freine les circulations marines et active la remontée d'eaux anoxiques profondes. Le coup de grâce est donné par les extrusions du volcanisme gigantesque qui recouvre de plusieurs kilomètres d'épaisseur de laves une partie de la Sibérie, tout en envoyant dans l'atmosphère des gaz carboniques, sulfureux et d'autres éléments toxiques, ainsi que celui du volcanisme explosif qui secoue les terrains qui se trouvent en Chine du Sud et les recouvre de niveaux de cendres volcaniques. Le résultat final, avec l'abaissement de la quantité d'oxygène disponible, est la destruction radicale des écosystèmes aussi bien dans les océans stagnants et acidifiés que sur terre où l'on trouve les témoins de vastes incendies et de colonisation des sols par des cryptogames parasites.

A. BAUD

Bibliographie sommaire: page suivante

Bibliographie sommaire

- Baud A., Cirilli S. and Marcoux J., (1997). – Biotic response to mass extinction: the Lowermost Triassic microbialites. *Facies*, 36, p. 238-242.
- Baud A., Holser W.T. and Magaritz M. (1989). – Permian-Triassic of the Tethys: Carbon isotope studies. *Geol. Rundschau*, 78, p. 649-677.
- Baud A., Richoz S. and Marcoux J. (2005). – Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units: western Taurus occurrences (SW Turkey). *Comptes Rendus Palevol*, 4, p. 569-582.
- Baud A., Richoz S. and Pruss S. (2007) - The lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time. *Global and Planetary Change*, 55, p. 81-89.
- Beauchamp B. and Baud A. (2002). – Growth and demise of Permian biogenic chert along northwest Pangea: evidence for end-Permian collapse of thermohaline circulation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 184, p. 37-63.
- Brayard A., Escarguel G., Bucher H., Monnet C., Bruhwiler T., Goudemand N., Galfetti T. and Guex J., (2009). – Good Genes and Good Luck: Ammonoid Diversity and the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 325, p. 1118-1121.
- Brennecke G.A., Herrmann, A.D., Algeo, T.J., Anbar, A.D., (2011). – Rapid expansion of oceanic anoxia immediately before the end-Permian mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, p. 17631-17634.
- Ehrenberg S.N., Svånå T.A., Swart P.K. (2008). – Uranium depletion across the Permian-Triassic boundary in Middle East carbonates: Signature of oceanic anoxia. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 92, p. 691-707.
- Erwin D.H. (2006). – *Extinction: How Life Nearly Died 250 Million Years Ago*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press. 296 p.
- Georgiev S., Stein H.J., Hannah J.L., Bingen B., Weiss H.M., Piasecki S. (2011). – Hot acidic Late Permian seas stifled life in record time. *Earth planet. Sci. Lett.*, 310, p. 389-400.
- Grice K., Nabbefeld B., Maslen E. (2007). – Source and significance of selected polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments (Hovea-3 well, Perth Basin, Western Australia) spanning the Permian-Triassic boundary. *Organic Geochemistry*, 38, p. 1795-1803.
- Holser W.T. (1984). – Gradual and abrupt shifts in ocean chemistry during Phanerozoic time, in: Holland, H.D., Trendall, A.F. (eds.), "Patterns of Change in Earth Evolution. Springer-Verlag", p. 123-143.
- Isozaki Y. (2009) - Illawarra Reversal: The fingerprint of a superplume that triggered Pangean breakup and the end-Guadalupian (Permian) mass extinction. *Gondwana Res.*, 15, 421-432.
- Jin Y.G., Wang Y., Wang W., Shang Q.H., Cao C.Q., Erwin D.H. (2000). – Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 289, p. 432-436.
- Kershaw S., Crasquin S., Li Y., Collin P.Y., Forel M.B., Mu X., Baud A., Wang Y., Xie S., Maurer F., Guo L. (2012). – Microbialites and global environmental change across the Permian-Triassic boundary: a synthesis. *Geobiology*, 10, p. 25-47.
- Marengo P.J., Corsetti F.A., Baud A., Bottjer D.J., Kaufman A.J. (2005). – Euxinia as the cause of the end-Permian mass extinction: evidence from sulfur isotope chemostratigraphy. In *Earth Systems Processes meeting*, Geol.Soc. of America Abstract book, Calgary.
- Mundil R., Ludwig K.R., Metcalfe I., Renne P.R. (2004). – Age and Timing of the Permian Mass Extinctions: U/Pb Dating of Closed-System Zircons. *Science*, 305, p. 1760-1763.
- Orchard M.J. (2007). – Conodont diversity and evolution through the latest Permian and Early Triassic upheavals. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 252, p. 93-117.
- Payne J.L., Turchyn A.V., Paytan A., DePaolo D.J., Lehrmann D.J., Yu M., Wei J. (2010) - Calcium isotope constraints on the end-Permian mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, p. 8543-8548.
- Rampino M.R., Prokoph A., Adler A.C., (1999). – Permian/Triassic boundary events: high resolution stratigraphy based on fast-Fourier transform and wavelet analyses of Milankovitch cyclicity, in: GSA (Ed.), *GSA Annual Meeting*, Denver.
- Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Y., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Y., Scott R.A., Saunders A.D. (2009). – The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 277, p. 9-20.
- Richoz S., Krystyn L., Baud A., Brandner R., Horacek M., Mohtat-Aghai P., (2010). – Permian-Triassic boundary interval in the Middle East (Iran and N. Oman): Progressive environmental change from detailed carbonate carbon isotope marine curve and sedimentary evolution. *J. Asian Earth Sci.*, 39, p. 236-253.
- Sanei H., Grasby S.E., Beauchamp B. (2012) – Latest Permian mercury anomalies. *Geology*, 40, p. 63-66.
- Shen S.-Z., Crowley J.L., Wang Y., Bowring S.A., Erwin D.H., Sadler P.M., Cao C.-Q., Rothman D.H., Henderson C.M., Ramezani J., Zhang H., Shen Y., Wang X.-d., Wang W., Mu L., Li W.-Z., Tang Y.-G., Liu X.-L., Liu L.-J., Zeng Y., Jiang Y.-F., Jin Y.-G., (2011). – Calibrating the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 334, p. 1367-1372.
- Shen Y., Farquhar J., Zhang H., Masterson A., Zhang T., Wing B.A. (2011). – Multiple S-isotopic evidence for episodic shoaling of anoxic water during Late Permian mass extinction. *Nat. Commun.* 2, 210.
- Silva-Tamayo J.C., Nägler T.F., Newton R., Wignall P., Grice K., Bottcher M.E., (2009). – Global shallow marine euxinia triggering the latest Permian mass extinction: Evidence from Mo-isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta Supplement*, 73, A1224.
- Svensen H., Planke S., Polozov A.G., Schmidbauer N., Corfu F., Podladchikov Y.Y., Jamtveit B. (2009). – Siberian gas venting and the end-Permian environmental crisis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 277, p. 490-500.
- Visscher H., Sephton M.A., Looy C.V. (2011). – Fungal virulence at the time of the end-Permian biosphere crisis? *Geology*, 39, p. 883-886.
- Yin H., Zhang K., Tong J., Yang Z., Wu S. (2001). – The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian-Triassic Boundary. *Episodes*, 24, p. 102-114.