

## **Le champ géothermique de Larderello (Toscane, Italie) : situation géologique, utilisations industrielles, rôle de la famille de Larderel**

par Michel DURAND-DELGA <sup>1</sup>, Enrico PANDELI <sup>2</sup> et Giovanni BERTINI <sup>3</sup>

*RÉSUMÉ.*– L'activité géothermique à Larderello est liée au contexte géologique particulier de la Toscane méridionale : croûte amincie, anomalie positive marquée du flux de chaleur, magmatisme et importants phénomènes hydrothermaux. La famille du dauphinois François Larderel, devenu comte de Montecerboli, a eu un rôle essentiel dans le développement de la région. Dans la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle, en effet, elle mit au point l'industrie d'extraction de l'acide borique (près de 300.000 t de 1818 à 1940) à partir des manifestations naturelles des soffioni et lagoni. Au début du 20<sup>e</sup> siècle s'ajoute à l'industrie chimique la production d'énergie électrique, pionnière dans le monde, par l'exploitation des fluides endogènes à haute enthalpie. Actuellement la puissance géothermoélectrique cumulée des champs de Larderello et Monte Amiata est de 728 MW, qui correspond sensiblement à 2% de la production totale de l'Italie. Après avoir donné une synthèse géologico-géothermique modernisée de la Toscane, ce travail retracera brièvement le rôle des Larderel, issus d'une famille marchande de St-Etienne et Vienne, qui émigra à la fin du 1<sup>er</sup> Empire et s'intégra, grâce à ses exceptionnels succès industriels, dans les hautes sphères du Grand-Duché de Toscane puis du royaume d'Italie.

*MOTS-CLÉS.*– Lagoni de Larderello, Soffioni, Structure de l'Apennin toscan, Industrie du Bore, Electricité géothermique, Famille Larderel.

## **The Larderello geothermal field (Tuscany, Italy) : geological setting, industrial productions, action of the Larderel's family**

*ABSTRACT.*– At Larderello (southern Tuscany, Italy) the geothermal activity is linked to the peculiar geological features of this region : thinned crust, strong positive anomaly of the heat flux, magmatism and important hydrothermal phenomenon. François Larderel, issued from Dauphiné (southeastern France) and become count of Montecerboli, played himself and his family an essential role in the development of this region. Indeed, during the first half of the 19<sup>th</sup> century, this family finalized the extraction of boric acid (about 300.000 t from 1818 to 1940) from the natural irruptions of the soffioni and lagoni. At the beginning of the 20<sup>th</sup> century the chemical industry was complemented by the worldwide pioneer production of electric energy obtained by exploiting highly energetic endogenous fluids. Currently the cumulated geothermal and electric power from the Larderello and Monte Amiata is about 728 MW, this approximately corresponding to 2% of the total production of Italy. After a renewed synthesis of geology and geothermy of Tuscany, this paper briefly describes the role of the Larderel's, a family of traders who emigrated from St-Etienne and Vienne (France) to Tuscany by the end of the first french Empire and become integrated to the high society of the Grand Duchy of Tuscany because of its exceptional industrial success.

*KEY WORDS.*– Lagoni, Soffioni, Structure of the Tuscan Apennine, Bore industry, Geothermal electricity, *Larderel* family, Larderello.

---

<sup>1</sup> La Péliiserie, 81150 Florentin. France.

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze de la Terra, Università di Firenze, 4 Via La Pira, 50121 Firenze. Italie.

<sup>3</sup> ENEL-ERGA, Via A. Pisano 120, 56100 Pisa. Italie.

## 1. – INTRODUCTION

Parmi les nombreuses particularités géologiques de la Toscane figurent ses champs géothermiques, dont l'existence est universellement connue. Quatre d'entre eux sont actuellement en exploitation (fig. 1) : Larderello et, juste à l'est, Travale-Radicondoli ; Monte Amiata au sud-est de la Toscane ; Latera (Latium septentrional). Le nom de Larderello (fig. 2) en particulier possède une résonance mondiale du fait qu'il a constitué le premier exemple d'utilisation de fluides naturels pour la production d'énergie électrique. Il doit en outre être rappelé que l'activité industrielle de cette région a pris naissance au début du 19<sup>e</sup> siècle par la production industrielle de l'acide borique des « lagoni » grâce aux travaux du dauphinois François Larderel, qui sera nommé par le grand-duc de Toscane comte de Montecerboli, pour ses activités d'entrepreneur et son rôle social. De fait celui-ci avait, en une quarantaine d'années, réussi à créer une admirable organisation

sociale et industrielle, très en avance sur son temps, dans une région inhospitalière et déserte, qui fut dénommée « Larderello » (1846) en son honneur. Afin de faire connaître en France cette exemplaire réussite, sera fourni le tableau, au début du 3<sup>e</sup> millénaire, de la situation géologique et géothermique (typologie, circulation et modes d'utilisation des fluides endogènes) du champ de Larderello.

Cette région de Toscane vit accourir, dès le second quart du 19<sup>e</sup> siècle et jusqu'après la Seconde Guerre Mondiale, des cohortes de géologues de tous pays, venus s'informer des phénomènes naturels, lagoni et soffioni, et, au 20<sup>e</sup> siècle, des réussites de la géothermie, dans cette zone à l'ouest de la dorsale des Apennins. Depuis que les regards de la science se sont portés sur le globe tout entier, l'attrait de ce champ géothermique européen exceptionnel, situé à l'ouest de Sienne, a paru décroître. Curieusement d'ailleurs puisque, depuis un demi-siècle, de considérables progrès viennent d'y être réalisés, à la suite de nouvelles études litho- et bio-

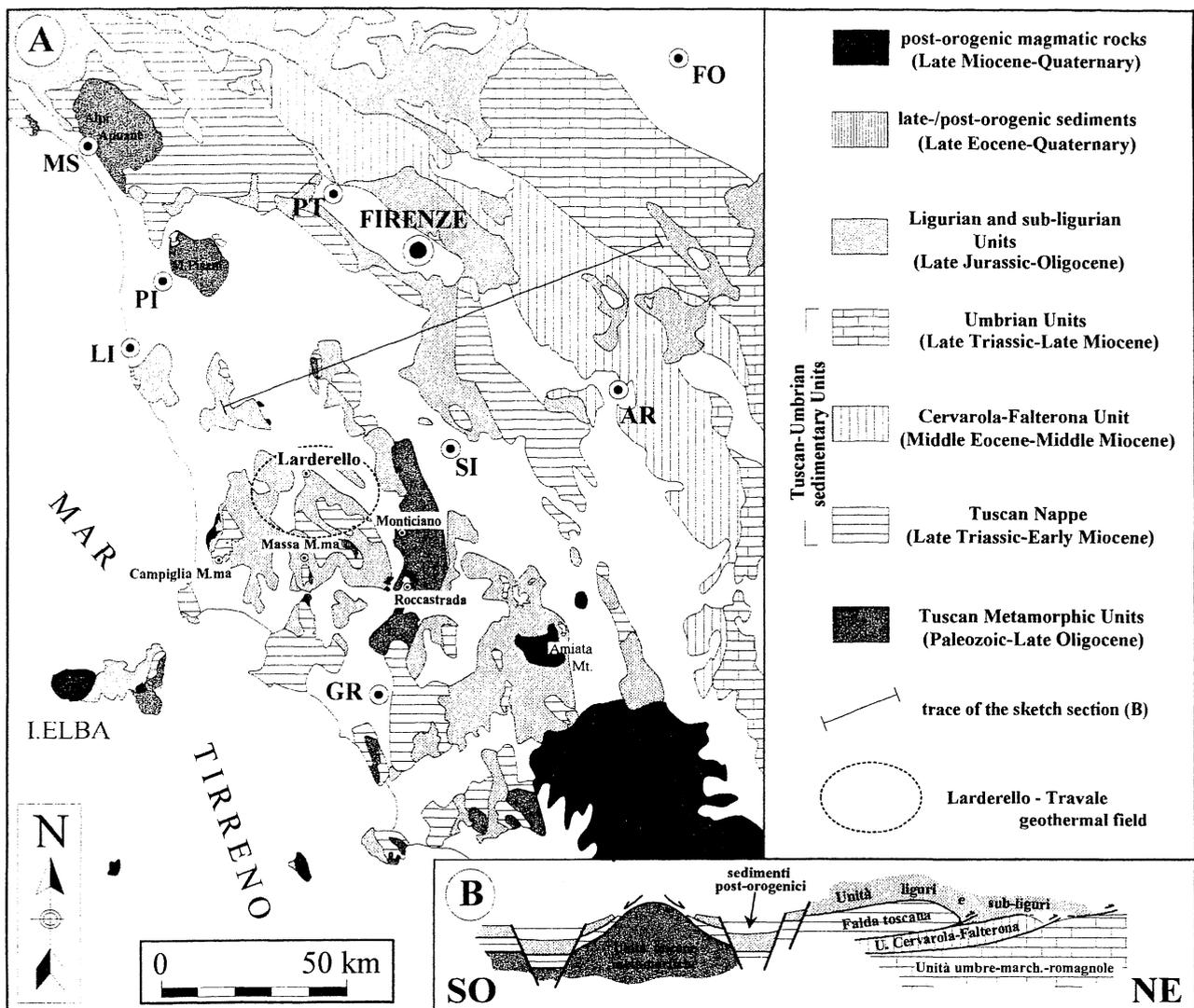


FIG. 1. – Carte (A) et section géologique (B) schématique de l'Apennin septentrional.

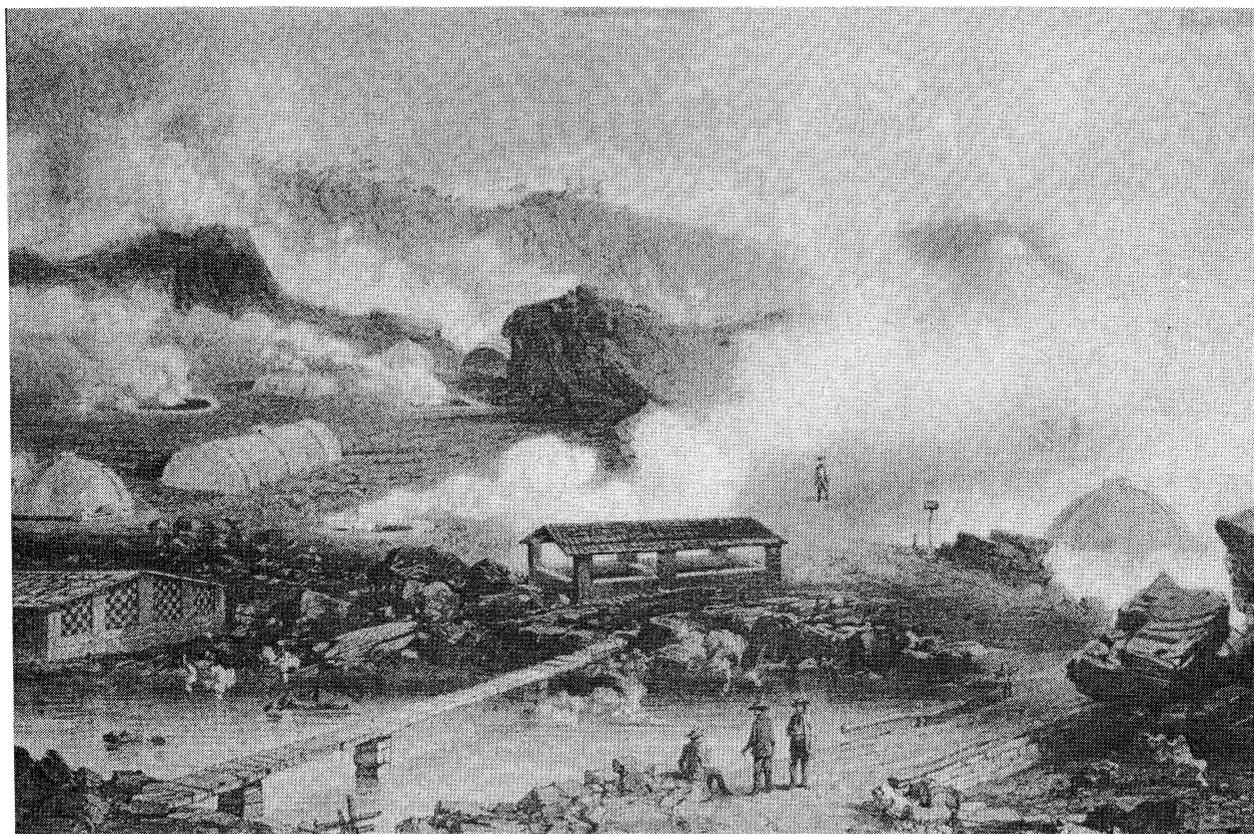


FIG. 2. – La vallée de Larderello (Valle del Diavolo), gravure du XIX<sup>e</sup> siècle.

stratigraphiques, d'une cartographie de surface méthodique et surtout grâce aux résultats de forages à grande profondeur et à la géophysique.

## 2. – TÉMOIGNAGES SUR LES LAGONI, DE L'ANTIQUITÉ AUX DÉBUTS DE LA GÉOLOGIE

Dans cette région de Volterra, sur environ 200 km<sup>2</sup> entre les vals Cecina et Cornia, les manifestations spectaculaires des soffioni et des lagoni ont évidemment été observées dès la plus haute antiquité. Longtemps jugées comme d'origine surnaturelle, elles résultent – nous le savons maintenant – beaucoup plus prosaïquement, de la remontée brutale, à travers une croûte amincie, d'eaux surchauffées au contact de corps granitiques restés en profondeur, mis en place depuis 6 Ma et en voie de refroidissement.

Les Étrusques, une dizaine de siècles av. J.-C., ont dû utiliser les sels de bore des lagoni pour la préparation de leurs émaux. La première représentation graphique du site serait celle de la célèbre Table dite de Peutinger : sur cette carte des voies militaires du monde romain, qui aurait été dessinée entre les 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> siècles ap. J.-C., figure, entre deux établissements thermaux (Acquae

Volaterranae et Acquae Populoniae) un lac circulaire, qui peut correspondre à la zone des lagoni.

Mazzoni [1948] rappelle l'existence de parchemins du 8<sup>e</sup> siècle et de documents de l'an 1000 mentionnant les eaux chaudes du Val di Cornia, et l'apparition à la suite d'un tremblement de terre du « Lago Sulfureo », à une date indéterminée (1282 ou 1320). Certains ont supposé que Dante pensait aux lagoni en écrivant, dans « La Divine Comédie » (canz. 8a, stanza 5a) :

*« Versan le rene le fumifere acque  
Per li vapor che la terra ha nel ventre  
Che d'abisso le tira suso in alto »*  
(Les eaux fumifères épanchent leur rein  
Par les vapeurs que la terre a dans le ventre  
Qui des abîmes les tirent vers le haut)

D'ailleurs la dénomination de Montecerboli, lieu-dit qui sera érigé en comté pour François Larderel, ne dérive-t-elle pas [Coquand, 1848] du nom du chien Cerbère, gardien de l'entrée des enfers !

Nombreux furent, du 13<sup>e</sup> au 19<sup>e</sup> siècles [Michelleti, 1943], les littérateurs et les naturalistes qui évoquent les phénomènes du Volterrano. Doit être surtout mentionné le Dr Giovanni Targioni Tozzetti (1712-1783) qui, à la suite de ses voyages en Toscane de 1742

à 1751, décrit (1769) en détail les lagoni, signalant, comme certains de ses devanciers, la présence de soufre, alun, sel et vitriol. Il compara fort justement ces dépôts aux minerais des filons qui lardent les Colline Metallifere environnantes.

Immédiatement après la première annonce, à l'Académie des Sciences de Paris, de ses célèbres observations des basaltes d'Auvergne, Nicolas Desmarests (1725-1815) vint en Italie, pendant près d'un an [Taylor, 1995]. Il accompagnait le jeune duc Alexandre de La Rochefoucauld d'Enville – qui deviendra un réputé minéralogiste amateur – dans son voyage d'initiation aux sciences. Le groupe restera un mois (septembre-octobre 1765) en Toscane, visitant Targioni Tozzetti et parcourant le pays, en particulier la route de Florence à Sienne et Volterra. Ce sera seulement en 1809 et 1811 que quelques allusions à ce long voyage italien seront publiées par Desmarests sous forme d'articles séparés dans sa « Géographie Physique » de l'« Encyclopédie Méthodique ». Que les voyageurs aient vu les lagoni du Volterrano est vraisemblable, bien que Desmarests précise que ses descriptions des « bullicame » [Desmarests, 1809, t. 3, p. 240-245] et des « lagonis » (sic) [idem, p. 477] de Monte Cerboli [idem, p. 329-330] sont tirées de Mascagni, probablement aussi celles de Castelnuovo [idem, p. 305-308], de Monte Rotondo [1811, t. 4, p. 656-657] et des solfatares de Libbiano [idem, p. 508-509]. Desmarests estime que « les lagoni du Volterre », comme les sources d'eau chaude et les mofettes, traduisent la présence en profondeur de « matières combustibles », et que leur eau « est fournie par des sources souterraines ». Du grand nombre des lagoni, il conclut que « la nature a déposé dans les filons [= roches plissées ou redressées !] des montagnes primitives [= les reliefs de l'Apennin] de la Toscane inférieure, une grande quantité de soufre et de métaux ». On est surpris que Desmarests, s'il parle du dépôt d'alun, ne cite pas l'acide borique que Mascagni avait caractérisé dès 1779.

Passa bientôt Horace-Bénédict de Saussure. A. Carozzi [2000] vient de publier des extraits des carnets du voyage en Italie que le célèbre Genevois effectua, avec sa famille, en 1772-1773. Basé à Florence du 16 novembre au 5 décembre 1772, Saussure y rencontra Targioni Tozzetti dont il avait évidemment lu les récents « viaggi » en Toscane. Le voici donc, le jeudi 10 décembre, descendant de la haute butte calcaire pliocène de Volterra, franchissant à gué la rivière Cecina et remontant par Pomarance pour atteindre les lagoni de Montecerboli. Ce sont, écrit-il :

« des creux plus ou moins profonds, plus ou moins remplis d'une eau boueuse qui bouillonne avec la plus grande violence et dont la vapeur s'élève à une hauteur considérable et d'une si grande épaisseur qu'elle cache le soleil à une grande distance comme le ferait un nuage... Ce spectacle outre l'intérêt qu'il présente pour celui qui cherche à en comprendre la cause, est tout à fait singulier et merveilleux. Cette fumée qui s'élance avec impétuosité, difficile d'imaginer, du fond de ces

gouffres et puis s'élève en tourbillons jusqu'au ciel où elle paraît d'en bas former des nuages, le bruit effroyable et varié de ces énormes chaudières, dont les uns ont des sifflements, d'autres des bruits cadencés comme celui d'un moulin, d'autres celui d'un grand bouillonnement ; la vapeur qui, lorsque le vent se calme pour un instant, laisse voir cette vase en bouillonnement qui lance des jets à une hauteur considérable nous donne une idée des chaudières de l'enfer. »

On est surpris que Saussure n'aborde que le côté pittoresque des lagoni et soffioni, sans allusion à l'explication alors donnée en général pour les montées volcaniques : la combustion souterraine de matériaux bitumineux.

Ce sera donc un chimiste, Umberto-Francesco Hoefer, surintendant de la pharmacie du Grand-Duché de Toscane, qui fera entrer ces phénomènes dans l'ère scientifique en analysant, en octobre 1779, des eaux du grand lagone « Cerchiaio » de Monte Rotondo, où il découvre la présence de 0,5% d'acide borique. Ce que confirmera, deux ans plus tard, le chimiste Paolo Mascagni (1755-1815), professeur d'anatomie à l'université de Sienne, qui, en 1799, décrira, après Targioni, les lagoni du Volterrano.

A l'automne 1787, le chevalier Déodat de Dolomieu, séjournant à Rome, parcourt les régions voisines. Dans une lettre du 31 octobre à son ami toulousain Ph. Picot de Lapeyrouse [in Lacroix, 1921, t. I], il annonce avoir « trouvé des phénomènes bien singuliers et très peu connus, entre autres les lagoni des Maremmes de Toscane, où l'on trouve le sel sédatif actif (Lacroix précise qu'il s'agit de l'acide borique naturel ou sassolite) ; je n'ai rien vu qui m'ait autant étonné. » Dolomieu, moins expansif que Saussure, peut faire état des tout récents résultats des analyses chimiques de Hoefer et de Mascagni.

Le calme étant revenu en Europe après l'époque napoléonienne, ce va être, dans le Volterrano, un défilé incessant de géologues de diverses nationalités, parmi lesquels le célèbre anglais Murchison. La comparaison implicite avec les phénomènes volcaniques sera exprimée par Bernard Palassou, pionnier de la géologie pyrénéenne. Bien qu'il ne soit jamais sorti de France, il avait connaissance des phénomènes de Toscane, sans doute par la lecture de l'ouvrage de Desmarests, car il écrivait, en 1815 : « Quoique les sulfures métalliques ou les charbons de terre, une fois enflammés semblent annoncer leur prochaine destruction, il paraît néanmoins qu'ils peuvent brûler tranquillement et pendant une longue suite de siècles ; nous en avons des exemples dans les lagoni de Toscane et la solfatare de Pouzzoles qui, dès le temps de Strabon, exhalait des vapeurs. »

Ce ne sera que beaucoup plus tard, en 1848, que le monde scientifique pourra enfin lire dans une revue bien diffusée, le bulletin de la Société géologique de France, un très long article d'Henri Coquand, futur professeur de géologie aux universités de Besançon puis de Marseille, pour l'heure ingénieur aux mines de

Campiglia. Décrivant les « solfatares, alunières et lagoni de la Toscane », il écrit, dans le style de l'époque :

« On ne saurait maîtriser ses émotions, lorsqu'on se trouve pour la première fois en face d'un lagoni [sic]. Comme rien ne nous prépare au spectacle qui vous attend, on jouit à la fois de sa surprise et de la majesté de la scène qui se déroule devant vous. Qu'on se figure des montagnes crevassées laissant échapper avec un sifflement particulier des masses énormes de vapeurs qui embrument l'atmosphère et s'élançant en colonnes torsées jusqu'à la hauteur de 30 à 40 mètres ; le terrain brûlant sous vos pieds et menaçant de vous englober ; l'eau des lagoni bouillonnant avec fureur dans les bassins qui les retiennent et s'épanouissant en gerbes comme des geysers ; qu'on se représente la désolation des lieux où s'accomplissent ces phénomènes incessants, et l'on comprendra les impressions profondes sous lesquelles l'âme ploie et s'élève alternativement en présence de ces scènes de violence et de convulsion » !

Coquand définit les lagoni comme résultant de l'« émission violente de vapeurs chaudes chargées d'hydrogène sulfuré à travers les fissures du sol », et il précise le sens des divers termes appliqués à ces émissions : les lagoni sont des dépressions naturelles du sol, ordinairement remplies d'eau bouillonnante (= « bulicami »), d'où s'élançant des vapeurs brûlantes. Quant aux soffioni (ou « fumacchi »), il s'agit de fumerolles ou de jets de vapeur sulfureuse. Et Coquand conclura : « Il serait superflu de démontrer [...] que les lagoni de la Toscane ne sont qu'un épisode particulier des phénomènes volcaniques ; leur activité, la nature de leurs produits ne peuvent laisser aucun doute à cet égard. »

On arrêtera ce rappel historique au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, quand l'industrie boracifère des Larderel sera en plein essor. Après cette période, les études, tant techniques que géologiques, se sont multipliées dans cette région qui par décision (« motu proprio ») du Grand Duc de Toscane avait pris à partir de 1846 le nom de Larderello. A. Mazzoni [1948 et 1951] donnera une excellente mise au point sur les divers sites du champ de Larderello, avec des considérations géologiques, inspirées par un article de l'ingénieur B. Lotti [1928], et fera l'histoire de l'exploitation industrielle du champ, accompagnée d'une abondante bibliographie.

### 3. – GÉOLOGIE

L'Apennin septentrional, rameau du faisceau orogénique alpino-himalayen, est constitué par l'empilement d'unités tectoniques à vergence E à NE, provenant de plusieurs domaines paléogéographiques (fig. 1, A et B). Plus précisément ces unités, dérivant de la déformation et de la cicatrization du secteur liguro-piémontais, qui appartient au domaine océanique de la Téthys occidentale (unités liguro-piémontaises, ligures

et sub-ligure) ont chevauché les unités résultant de la tectonisation de la paléo-marge continentale adriatique (unités toscanes et unités ombro-marcho-romagnoles). De nombreux schémas de l'évolution géologique du complexe édifice structural nord-apenninique ont été proposés successivement par des chercheurs italiens ou autres [Sestini, 1970 ; Boccaletti *et al.*, 1980 ; Principi et Treves, 1984 ; Carmignani et Kligfield, 1990 ; Fazzuoli *et al.*, 1994 ; Bertini *et al.*, 1994 ; Jolivet *et al.*, 1998 ; Doglioni *et al.*, 1998, avec bibl.]. On admet en tout cas qu'aux phénomènes de déformation liés à la phase Crétacé supérieur – Eocène de fermeture océanique (stade du prisme d'accrétion) ont fait suite, de l'Eocène supérieur au Miocène inférieur, la collision continentale et le serrage entre les blocs continentaux corso-sarde et adriatique (stade ensialique), avant le relâchement des contraintes et l'émersion de la chaîne, qui ont débuté au Miocène moyen-supérieur. Ce dernier stade en extension a été essentiellement marqué par un système de failles normales de bas puis de fort angle [Lavecchia, 1988 ; Carmignani et Kligfield, 1990 ; Bertini *et al.*, 1991 ; Keller *et al.*, 1994]. Il en est résulté (fig. 3, a) un fort amincissement crustal, autour de 20-22 km, de l'aire toscane interne et nord-tyrrhénienne [Boccaletti *et al.*, 1985 ; Morelli *et al.*, 1998]. Les dépressions tectoniques, généralement de direction apenninique, qui en résultèrent correspondent à des bassins néo-autochtones fluvio-lacustres et marins, principalement d'âge Miocène supérieur à Quaternaire [Carmignani *et al.*, 1995 ; Bartole, 1995 ; Martini et Sagri, 1993 ; Bossio *et al.*, 1993]. En outre, à la remontée asthénosphérique qui en est résultée sont dues les anomalies positives régionales accusées (fig. 3, B) du flux de chaleur terrestre [Mongelli et Zito, 1991 ; Mongelli *et al.*, 1998] et le développement d'un magmatisme anatectique et sub-crustal [Serri *et al.*, 1993, avec bibl.]. On doit souligner enfin l'éloquente migration dans le temps, de l'ouest vers l'est, du front orogénique (aujourd'hui observable dans la partie occidentale de l'Adriatique), suivi à l'arrière par l'ouverture progressive des bassins néo-autochtones et par le magmatisme [Elter *et al.*, 1975 ; Serri *et al.*, 1993].

Le phénomène d'extension géologique trouve son exemple le plus caractéristique en Toscane maritime où ont été mesurées (fig. 3, B) les valeurs maximales du flux de chaleur (plus de 1000 mW/m<sup>2</sup> à Larderello [Mongelli *et al.*, 1998]) et où sont répandues les manifestations magmatiques d'âge messinien à quaternaire (ainsi les granitoïdes de l'île d'Elbe, de Campiglia et celles, en profondeur, de Larderello) ; comme les venues hydrothermales (ainsi les fameuses minéralisations en fer et sulfures mixtes du district minier de Massa Maritima et de l'île d'Elbe [Tanelli, 1983] ou les fluides boracifères de Larderello) et les venues thermo-minérales de nombreux établissements thermaux.

De récents levés géologiques de surface et de nombreux sondages (plus de 700), dont certains ont une profondeur de plus de 4.000 m, ont été réalisés dans le

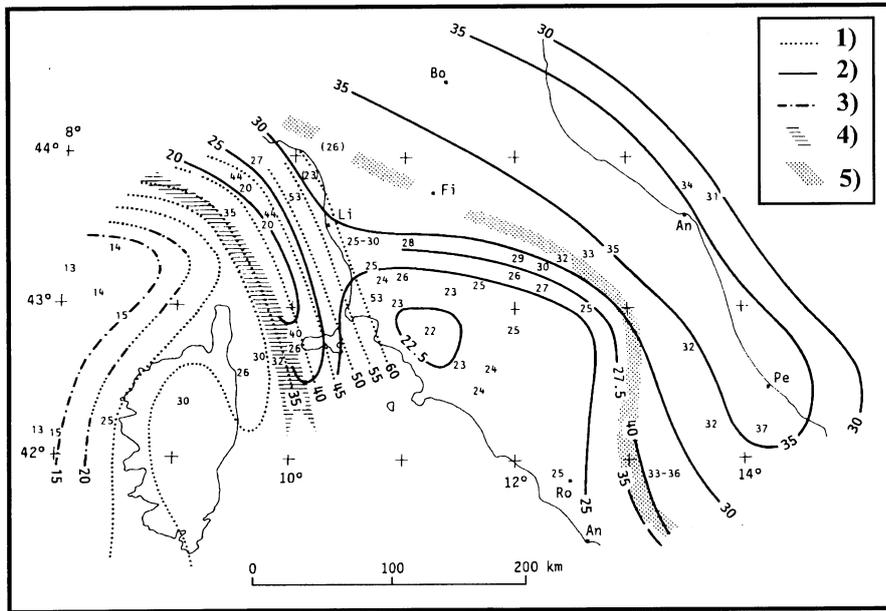


FIG. 3A. – Isobathes du Moho (a) dans l'Apennin septentrional et le Nord de la mer Tyrrhénienne [Minelli *et al.*, 1991] et anomalies du flux de chaleur (b) dans l'Apennin septentrional et le nord de la Tyrrhénienne. 1, croûte européenne ; 2, croûte adriatique ; 3, croûte océanique ; 4, limite occidentale de la croûte adriatique ; 5, limite entre croûte adriatique amincie et celle de l'avant-pays

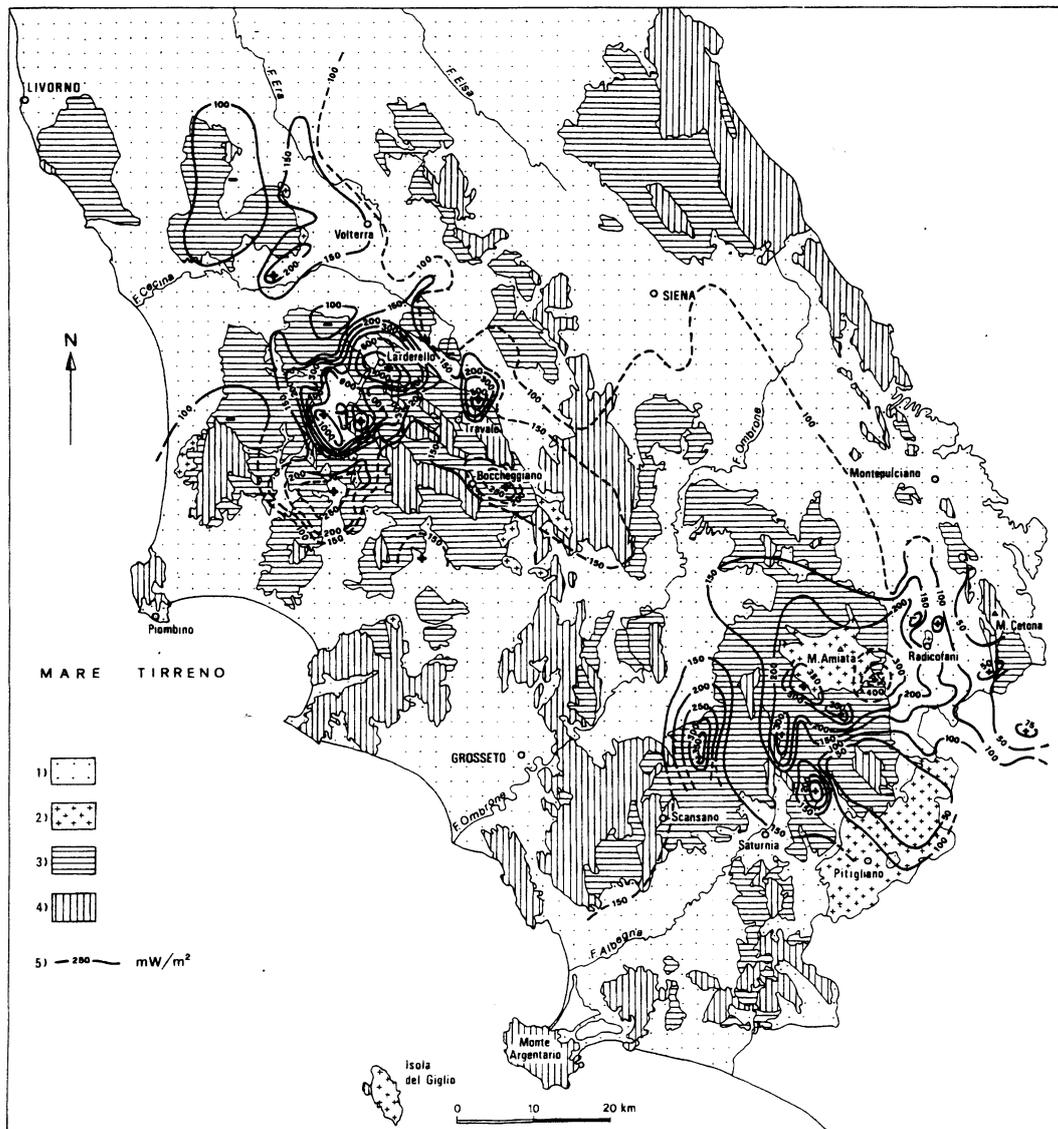


FIG. 3B. – Anomalies du flux de chaleur dans le sud de la Toscane [Baldi *et al.*, 1994]. 1, sédiments tardi- à post-orogéniques (Éocène supérieur à Quaternaire) ; 2, roches magmatiques post-orogéniques (Miocène supérieur à Quaternaire) ; 3, unités ophiolitiques ligures et sub-ligure (Jurassique supérieur à Oligo-cène) ; 4, unités toscanes, regroupées (Paléozoïque à Miocène inférieure) ; 5, lignes d'isoflux.

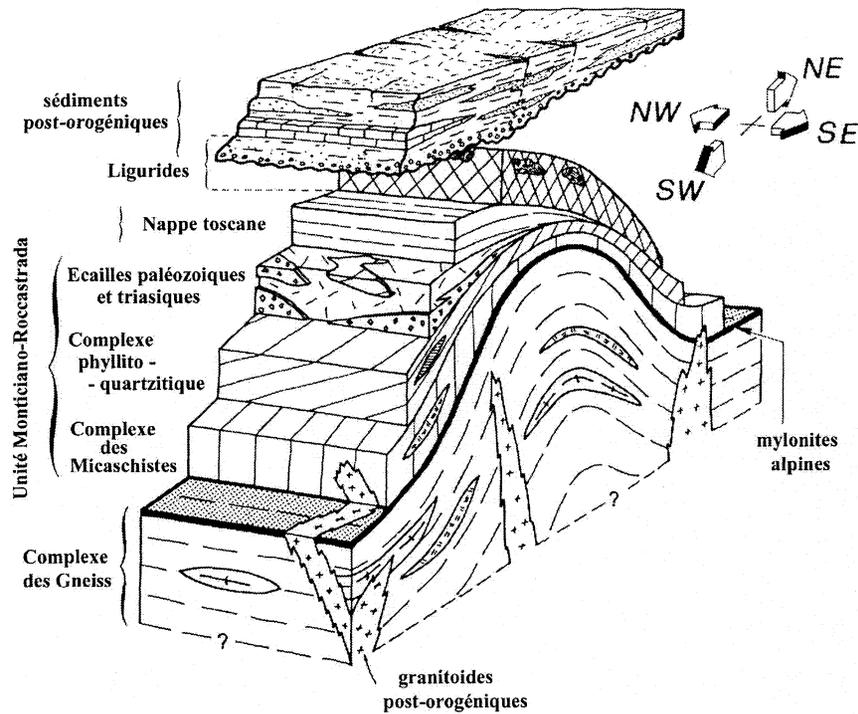


FIG. 4. – Coupe structurale et stratigraphique schématique du champ géothermique de Larderello [Elter et Pandelli, 1996].

champ géothermique de Larderello. Ils ont permis de reconstruire une succession détaillée de la croûte moyenne et supérieure en Toscane maritime [Burgassi *et al.*, 1983 ; Elter et Pandelli, 1990 et 1996 ; Bertini *et al.*, 1994 ; Pandelli *et al.*, 1991]. Ainsi ont pu être distinguées de haut en bas (fig. 4) les unités suivantes :

- **Néo-autochtone** : ces successions sédimentaires, liées à l'évolution post-orogénique, reposent en discordance stratigraphique sur les unités toscanes et ligures (ou sub-ligure). Sont représentées en particulier : des formations fluviolacustres du Pliocène supérieur – Quaternaire, marines du Pliocène, lacustres et marines à évaporites du Tortonien supérieur – Messinien.

- **Unités ligures et sub-ligure** : Ces unités d'origine océanique (unités ligures) et de la zone de transition à la marge continentale adriatique (unité sub-ligure) sont, de haut en bas : 1, Unité ophiolitique supérieure (Jurassique sup. – Crétacé inf.), essentiellement constituée d'Argiles à " Palombini " (micrites claires grano-classées) incluant des olistolites ophiolitiques ; 2, Unité de Lanciaia (Paléocène sup. – Eocène moyen), reposant en discordance stratigraphique sur l'unité suivante (3) et représentée par des brèches et grès ophiolitiques, passant vers le haut à un flysch carbonaté et silico-clastique ; 3) Unité ophiolitique inférieure (Jurassique sup. – Crétacé inf.), caractérisée par une puissante succession ophiolitique et une couverture réduite, volcanique et sédimentaire ; 4) Unité de Monteverdi-Marittimo (Crétacé sup. – Paléocène inf.), faite d'un Flysch à *Helminthoides* typique, de faciès calcaro-

marno-gréseux ; 5) Unité de Canetolo ou sub-ligure (Paléocène-Eocène moyen), représentée par des argilites à intercalations calcaires ou calcarénitiques et de grauwackes carbonatées.

- **Nappe toscane** : Cette unité non métamorphique est couronnée par des sédiments pélagiques, essentiellement pélitiques (Schistes Polychromes), qui passent vers le haut aux termes gréseux turbiditiques de l'Oligocène d'avant-fosse (Macigno). Plus bas, on trouve des termes pélagiques calcaro-silico-marneux (Calcare selcifero et Rosso Ammonitico, Marnes à Posidonies, jaspes) entre le Crétacé inférieur et le Lias. Les précèdent des sédiments carbonatés de plate-forme, du Trias à l'Hettangien (Fm. de la Spezia et Calcare Massiccio) qui surmontent, tout à la base de l'unité, un Trias à carbonates et évaporites (Anhydrites de Burano). La nappe toscane peut montrer des termes tectoniquement étirés (« série toscane réduite » des auteurs), qui peuvent totalement disparaître. En outre, sa base est marquée par un puissant horizon de cataclasites qui, en surface, correspondent à de typiques brèches carbonatées vacuolaires, qualifiées de « Calcare cavernoso ».

- **Unité toscane métamorphique** : 1) Unité de Monticiano-Roccastrada : sa partie supérieure est constituée d'un complexe d'écaillés tectoniques où alternent des successions d'anhydrites-dolomies triasiques et des roches épimétamorphiques essentiellement d'âges paléozoïque et triasique (Verrucano et Fm. des Tocchi des auteurs). Sa partie inférieure comprend des phyllades et des méta-grès du

Paléozoïque inférieur, à intercalations de metabasites (Complexe phyllado-quartzitique des auteurs) et qui passent vers le bas à des micaschistes à grenat avec lentilles amphiboliques (Complexe des Micaschistes), d'âge inconnu, probablement Paléozoïque inférieur ou plus ancien. 2) Unité des Gneiss, d'âge également ignoré, qui comprend des paragneiss à niveaux amphibolitiques et des orthogneiss, parfois ocellés. Dans cette unité, les forages ont traversé quelques corps de granitoïdes intrusifs et leurs cortèges filoniens d'âge pliocène ou quaternaire. Des mylonites quartzieuses alpines marquent le contact entre le Complexe des Micaschistes et l'Unité des Gneiss. En outre, à la différence des formations supérieures, fortement affectées par les déformations alpines pénétratives, les roches de l'Unité des Gneiss ont conservé leur structuration hercynienne (socle non déformé de l'avant-pays apenninique ?).

#### 4. – GÉOTHERMIE

Larderello est un champ géothermique à vapeur dominante, dont les fluides de haute enthalpie sont constitués de vapeur surchauffée et de gaz (en moyenne 5% en poids du fluide, jusqu'à un maximum de 20%), surgissant à une température entre 150 et 260°C, sous des pressions entre 4 et 20 bars (fig. 5). Le gaz est en général formé par 90% de CO<sub>2</sub>, avec de faibles quantités de H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> et NH<sub>4</sub>. Le débit des puits est en moyenne de 25 t/h de vapeur, mais il peut arriver à dépasser 350 t/h.

La figure 6 met en évidence le parcours des fluides météoriques entre les zones superficielles d'infiltration (roches-réservoir affleurantes) et la chambre géothermique profonde où, se réchauffant et éventuellement se mêlant à des fluides juvéniles, ils se transforment en vapeur surchauffée. Le réservoir classique, constitué par des roches carbonatées des unités toscanes, – qui ont acquis leur perméabilité par fracturation tectonique (failles normales) et aussi, de moindre manière, par dissolution – est confiné au-dessous de la substantielle couverture imperméable des unités ligures et sub-ligure. Les fluides géothermiques peuvent remonter à la surface le long d'un système de failles normales, à l'origine des manifestations naturelles (par exemple « lagoni » et fumerolles) ou sont interceptés par les forages.

Voici près d'une demi-siècle, le géologue G. Merla, professeur à l'université de Florence, avait déjà supposé [*in* Mazzoni, 1951] que les vapeurs boracifères de Larderello résultaient du refroidissement dû à la progressive consolidation d'un corps magmatique, épais d'une dizaine de kilomètres et pouvant avoir une surface de 200 km<sup>2</sup>. Mazzoni estimait que la production d'acide borique de 1818 à 1940 (282.000 tonnes d'acide à 82%) pouvait correspondre à la solidification de 2 km<sup>3</sup> de magma granitique.

Depuis les années 1960, l'exploration géothermique s'est consacrée à la recherche de fluides économiquement utilisables dans les horizons fracturés des unités métamorphiques, qui ont été rencontrés jusqu'au-delà de 4.000 m de profondeur, et même à la partie haute des intrusions granitoïdiques.

Au sommet du réservoir superficiel, la température dépasse localement 250°C, mais en profondeur la

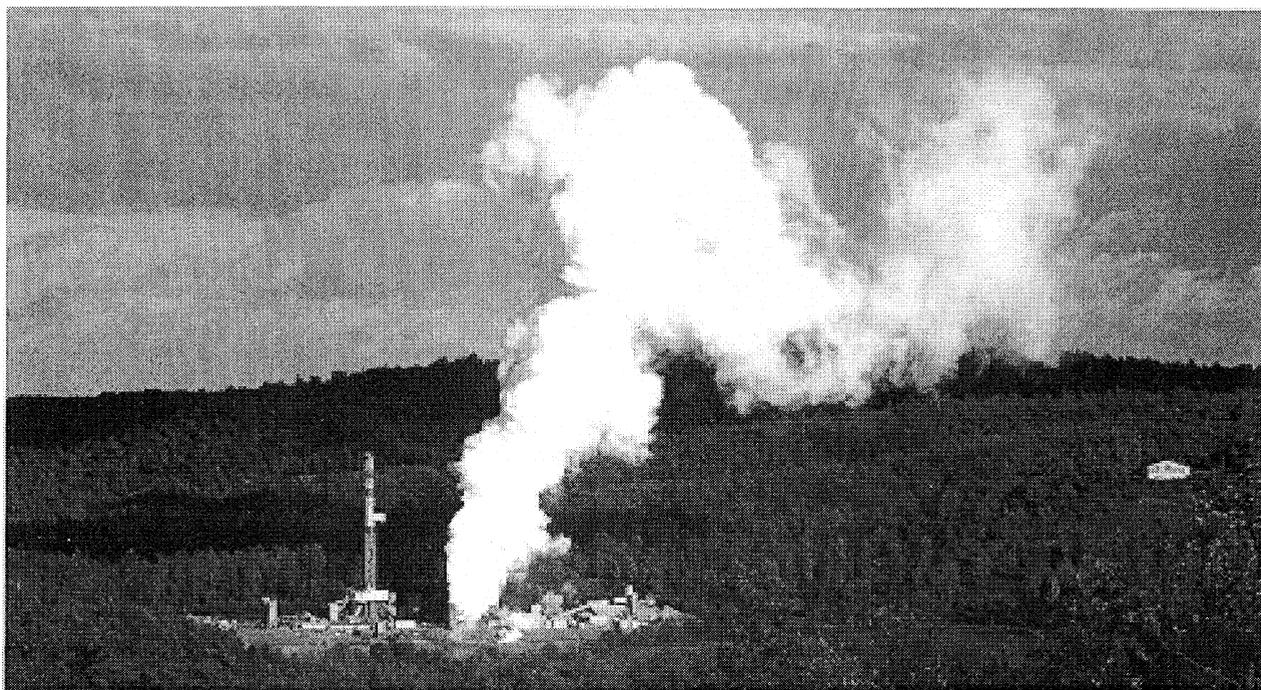


FIG. 5. – Puits géothermique en éruption.

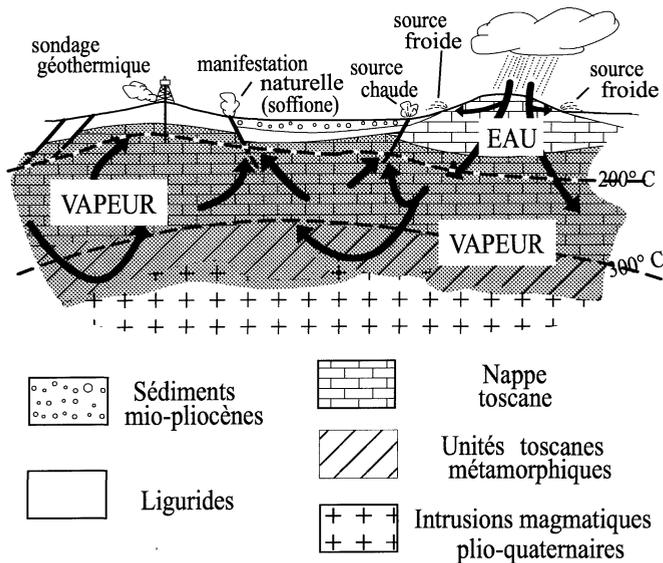


FIG. 6. – Schéma de la circulation des fluides dans le champ géothermique de Larderello.

distribution régionale devient plus uniforme. La température maximale enregistrée a été celle de 437°C à 3.225 m de profondeur, dans des roches du sous-bassement métamorphique, à la partie méridionale du champ géothermique. Dans de rares cas (ainsi le sondage S. Pompeo 2, toujours à la partie sud du champ), ont été même rencontrés des fluides à  $P > 240$  atm. et  $T > 400^\circ$ , très agressifs sur les appareils de perforation. Ces fluides sont probablement d'origine pneumatolytique, liés à l'enveloppe fracturée de corps intrusifs granitoïdiques enfouis.

Il est enfin intéressant de souligner que les fractures des roches-réservoir sont partiellement remplies d'associations minéralogiques hydrothermales qui possèdent une température d'équilibre un peu plus basse que celle de l'actuelle répartition thermique du champ, que ce soit verticalement ou en surface [Bertini *et al.*, 1985]. Ces données témoignent d'une évolution, dans le champ de Larderello, de fluides pneumatolytiques à hydrothermaux, avec des apports toujours plus importants d'eaux météoriques [Pandeli *et al.*, 1994, avec bibl.].

## 5. – UTILISATION DES FLUIDES GÉOTHERMIQUES : L'INDUSTRIE DU BORE

Les fluides endogènes de Larderello ont connu au cours du temps divers modes d'utilisation, qui ont toujours profondément influencé le développement économique et social de la Toscane [Burgassi et Burgassi, 1981 ; Burgassi, 1983 ; Burgassi *et al.*, 1995]. Leurs manifestations naturelles, dites « lagoni » (putzize, bulicami, mares d'eau et de vase en ébullition)

et « soffioni » (jets de vapeur et d'eau chaude) étaient déjà utilisées par les Étrusques (acide borique) et par les Romains (thermes). Au Moyen-Âge, on extrayait soufre, vitriol vert (= sulfate de fer) et alun, tandis qu'à la Renaissance l'activité thermique revint en faveur.

Si la présence d'acide borique dans les lagoni fut redécouverte en 1779 par Hoefler, ce fut seulement à partir de 1812, sous le gouvernement d'Elisa Bonaparte, que plusieurs sociétés tentèrent successivement, mais en vain, l'extraction industrielle du produit. Le procédé se basait alors sur la concentration des solutions boriques des lagoni par chauffage au bois dans des chaudières, puis refroidissement et cristallisation de l'acide dans des récipients en bois. Ces tentatives étaient justifiées par les multiples utilisations de l'acide borique et de ses dérivés (borax, ...) : industrie céramique, fabrication de certains verres, traitement de fibres textiles, antiseptiques, etc...

Et c'est là qu'entre en scène François Larderel.

Les influences que subit ce dernier avant son départ pour la Toscane tiennent à trois cités : Vienne sur Rhône, où il naquit en 1789 ; Saint-Etienne, où il passa ses vingt ans ; Crémieu, où il se maria. On repère les Larderel (ils ont toujours signé ainsi, même si jusqu'en 1800 leur nom est souvent écrit Larderet) à Saint-Etienne depuis le milieu du 15<sup>e</sup> siècle : ils étaient de bourgeoisie marchande, avec quelques échevins. Le dernier stéphanois du nom trouva femme à Vienne : l'enfant unique du couple, Georges-Pierre (1730-1786) s'y établit. Comme plus tard, son fils Abel-Philibert (1761-1808) – le père du futur comte François –, il est à la tête d'une société de commerce de « commissionnaire-chargeur », et « marchand de fer ». Les transports se faisant par eau, la famille Larderel était établie à la sortie nord de Vienne, port des Jacobins sur le quai du Rhône. Abel-Philibert épousa sa voisine Marie Acloque, fille d'un riche notable, aubergiste du Logis de la Table Ronde.

Les deux enfants du couple, François et sa sœur aînée, étaient tout jeunes quand mourut (1792) leur mère. Le père, qui figure jusqu'en 1793 – l'année de la Terreur – parmi les notables de Vienne, conclut un second mariage (1794) malheureux car il divorce en 1807. Ceci laisse croire que la jeunesse des deux enfants fut difficile, la famille étant ruinée par le marasme des affaires en ces années agitées. En 1808, meurt le père de François, lequel se réfugie à Saint-Etienne chez sa sœur Rose, qui avait épousé un cousin germain, Jean-Baptiste Lamotte, d'une vieille famille d'« arquebusiers » (armuriers). Le nouveau-venu y sera employé quelques années, soit chez son beau-frère, soit dans le magasin d'un commissionnaire en rubans.

Le jeune homme, ayant l'usage du négoce, que ses ascendants de tous côtés avaient pratiqué, devait méditer

une revanche sur le sort. L'occasion se présenta par un envoi à Livourne où Lamotte avait des relations commerciales et un dépôt d'armes. Mais la tourmente gagna la Toscane : les troupes françaises et la grande-duchesse Elisa fuient devant les napolitains du beau-frère le roi Murat passé aux Autrichiens, la ville gronde, les exilés de Corse débarquent... François Larderel a 25 ans. Peu après la première abdication de l'Empereur, il revient en France épouser, en septembre 1814, Pauline Morand (1790-1868), sa cousine germaine maternelle, issue d'une famille de marchands « fabricants de toile » de Crémieu près de Lyon. Le jeune couple s'installe à Livourne en ouvrant un « très modeste commerce » de broderie ou de rubans, le mari se faisant jusqu'en 1818 « marchand colporteur », selon le géologue Coquand [1848]. En circulant, Larderel est amené à connaître la région de Volterra et le caractère infructueux des tentatives d'extraction de l'acide borique.

Le français convaincu de riches compatriotes établis à Livourne, qui est un port franc, de constituer une société. Il obtient en 1818 la concession des lagoni de Montecerboli, propriété de la commune de Pomarance, et il va diriger les travaux. Après des années de tâtonnements avec utilisation du chauffage au bois, comme ses prédécesseurs, Larderel eut l'idée décisive de recouvrir d'une coupole en maçonnerie (« lagone coperto ») un lagone naturel : la vapeur surchauffée était canalisée vers des chaudières en cuivre, et l'évaporation, avec dépôt de l'acide borique, pouvait se faire continûment. Cette initiative fit la fortune de son auteur qui, resté seul, ses associés ayant été entre temps découragés, acheta tous les lagoni de la région, élimina les sociétés concurrentes et organisa des débouchés en France, Hollande, Angleterre.

Une autre intuition de François Larderel vers 1828 – la paternité de l'idée lui fut disputée ! – consista à implanter des forages afin d'extraire les gaz surchauffés du sous-sol, afin d'augmenter le débit disponible pour le chauffage des fours. En 1832, ce furent quelques tentatives infructueuses de forage à main. Ce ne fut que le 7 septembre 1856 – alors que Frédéric, fils aîné de François Larderel, avait pris la direction de l'industrie – que fut réalisé le premier forage géothermique positif [Burgassi, 1985] atteignant 30 m de profondeur, au lieu-dit San Federigo al Logo. Cela se passait trois ans avant l'historique sondage pétrolier (23 m) du « colonel » Drake aux Etats-Unis. 20 ans plus tard, en 1877, la profondeur atteinte était de 180 m.



FIG. 7. – Portrait de François de Larderel.

Cliché aimablement communiqué par le comte de Suarez d'Aulan, descendant de François de Larderel.

De 1832 à 1842, Larderel bâtit un véritable empire industriel d'un millier de personnes, avec neuf usines dispersées. Un « Regolamento generale » accompagnait une organisation sociale modèle (maisons ouvrières, « fonds sacré » pour pensions de vieillesse et d'invalidité, ateliers textiles pour les femmes, écoles pour les deux sexes, ...). Ce qui explique qu'en 1837, le Grand-Duc Leopoldo II conféra à François Larderel le titre de comte de Montecerboli. En 1858, quand meurt ce dernier de la malaria (nous sommes dans les insalubres Maremme !), l'industrie boracifère est au zénith : la production annuelle d'acide borique avait atteint 1000 t annuelles dès 1846, à comparer aux 50 t de 1818.

Deux des quatre fils de François Larderel et de Pauline Morand eurent un rôle important dans le développement de l'industrie boracifère de Larderello. L'aîné, Frédéric (1815-1876), qui administra la société à la mort de son père, devint un personnage important du jeune royaume d'Italie, partageant son temps entre ses

deux palais de Pomarance et de Livourne, les dimensions de celui-ci éclipsant celles du palais grand-ducal de cette ville ! Le troisième fils, Adrien (1823-1856) est à l'origine d'une innovation ingénieuse en 1842 : les « caldaie Adriane », appareils d'évaporation en plomb en longs tubes plats ouverts, légèrement inclinés et divisés par des ressauts transversaux, ce qui rendait l'évaporation plus rapide. Le cadet des frères, Edouard (1833-1854), éduqué comme ingénieur-chimiste destiné à l'établissement, mourut jeune. Quant au puîné Louis (1816-1863), aux goûts artistiques, il voulut rester français, partageant son temps entre Florence et Paris : sa fille Blanche (Bianca) épousa le comte Mirafiori, issu du mariage morganatique de Victor-Emmanuel II, roi de Piémont ; quant à son fils, diplomate français, il a transmis le nom des Larderel à de nombreux descendants, partis au Chili.

Fils unique de Frédéric, Florestano (1848-1925) prit la suite de son père et épousa sa cousine germaine Elisa de Larderel (fille d'Adrien). À la fin du 19<sup>e</sup> siècle, l'industrie boracifère toscane se heurta à la concurrence de la Californie (la « Death Valley » !). Grâce au chimiste F. Raynaut fut accrue, à partir de 1884, la pureté de l'acide borique, dont le titre passa progressivement de 82 à 90%, et l'on en tira, à Larderello même, le borax, accompagné de la fabrication du sulfate d'ammoniaque.

En 1912, Florestano abandonna les rênes de l'entreprise, qui se transforma en « Società boracifera di Larderello ».

#### 6.- LA CRÉATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À LARDERELLO

Gendre de Florestano de Larderel dont il avait épousé la fille Adriana, le prince Piero Ginori-Conti (1865-1939) prend en 1912 les rênes de l'industrie boracifère de Larderello : celle-ci, progressivement, abandonnait l'extraction des fluides endogènes pour traiter des minerais importés, comme la colemanite de Turquie. Quant à la seconde fille de Florestano, Federiga, elle épousa un diplomate, le baron Pompeo Aloisi, dont les descendants ont relevé le nom de Larderel.

L'utilisation des vapeurs endogènes du champ de Larderello devenant progressivement disponible, des expériences afin d'en tirer de l'énergie avaient été tentées par F. Raynaut dès 1894 : la vapeur sous pression des soffioni devait réchauffer l'eau d'une chaudière multitubulaire alimentée par un torrent voisin, mais ce fut un échec. Peu après son mariage, Piero Ginori-Conti reprit ces tentatives. Il réussit enfin en 1904, en utilisant de la vapeur sèche. L'année suivante, une dynamo de 35-40 HP permet l'illumination électrique de Larderello et le fonctionnement de perforatrices.

En 1913 est réalisée la première centrale géothermo-électrique de 250 KW. Progressivement, jusqu'en 1930, la puissance s'accroît jusqu'à obtenir trois groupes

thermo-alternatifs, l'un de 600, les autres de 800 KW. Dès lors, l'industrie chimique du borax est dépassée par la production électrique. La recherche de nouvelles sources de vapeurs surchauffées est liée à l'accélération des forages qui, après 1930, grâce à une méthode à percussion de type « Pennsylvanie », dépassent les 200 m de profondeur. Certains sont l'occasion d'explosions spectaculaires : le « Soffionissimo » de mars 1931 est accompagné d'un bruit assourdissant, perceptible jusqu'à Volterra (25 km) ! En 1951, il y a déjà 160 forages et l'emploi du procédé Rotary va permettre de dépasser la profondeur du kilomètre.

Entre temps, en 1944, avant la fin de la 2<sup>ème</sup> Guerre mondiale, les installations de Larderello, qui vont passer aux mains de l'État italien, sont détruites, puis rapidement reconstruites. La production électrique est de 258.500 KW en 1951 (Mazzoni, 1951).

Actuellement les centrales de Larderello ont atteint une puissance effective de plus de 400 MW. La puissance totale des centrales géothermiques italiennes est d'environ 728 MW. Elle représente environ 2% de l'énergie électrique produite globalement en Italie, ce qui suffirait pour l'alimentation d'une grande ville, comme Florence, et de sa zone industrielle.

#### 7. – EN GUISE DE CONCLUSION

Extraction et utilisation de sels boracifères d'abord, production d'énergie géothermo-électrique ensuite ont été les deux fleurons de Larderello. Il ne faut pas non plus oublier que les fluides endogènes à enthalpie moyenne-basse ( $T < 150^{\circ}\text{C}$ ), obtenus dans les sources naturelles ou les rejets des centrales géothermo-électriques, peuvent trouver maintes utilisations à l'échelle locale. Par exemple, outre les classiques usages thermaux, ces fluides sont exploités depuis de nombreuses années pour le chauffage urbain (ainsi à Larderello-village) ou pour des serres (floriculture dans la zone du Monte Amiata), ainsi que dans des buts zoo-techniques, comme l'ichtyoculture à Castelnuovo V.C.

Larderello, extraordinaire réussite industrielle pendant plus d'un siècle, porte ainsi hors de France le nom de son fondateur le dauphinois François de Larderel. Pionnier de l'industrie boracifère, son ingéniosité lui a permis d'en augmenter considérablement la production, grâce à son « lagone coperto » puis aux forages – l'un des premiers au monde pour des fluides « difficiles » lui est dû, en 1856 –. Le champ géothermique de Larderello a également vu la création et le développement significatif de ce type d'énergie électrique, grâce au prince Ginori-Conti, époux d'une arrière-petite fille de François de Larderel. Et tout cela résulte des caractéristiques géophysiques et géochimiques de cette région toscane, installée à quelques kilomètres au-dessus d'une masse granitique plio-quadernaire en cours de refroidissement.

Si, du fait de son origine dans une lointaine province à une époque troublée, François Larderel n'a pu être qu'un autodidacte, certes cultivé, il n'en reste pas moins qu'il possédait le flair du géologue appliqué à la recherche minérale et à son exploitation. De même que le nom du dauphinois Dolomieu est porté haut par « les Dolomites », la mémoire de son compatriote Larderel reste attachée, par le nom de « Larderello », à la terre de Toscane.

**Remerciements.** Nous remercions sincèrement l'ENEL-ERGA pour les données fournies et pour son aimable aide.

Nous savons particulièrement gré au Dr P.D. Burgassi pour les utiles entretiens et les indications historiques pour la période toscane des Larderel, ainsi qu'à M. Cappellini pour les visites au champ de Larderello. Le Pr. K.L. Taylor (Norman, Okl., U.S.A.) a orienté notre recherche sur N. Desmarests. Les responsables des archives communales de Vienne et de Saint-Etienne ont beaucoup facilité nos recherches. Celles à l'Archivio di Stata et à la Biblioteca Nazionale Centrale à Florence ont été facilitées par l'intervention de Elisa Padoa.

À Toulouse, Ph. Olivier a traduit le résumé anglais et A. Majesté-Menjoulas a bien voulu assurer la préparation technique du texte.

### Références techniques et historiques

- BIANCHI M.C., BURGASSI A. & BURGASSI P.D. (1995).– Francesco De Larderel: a critical analysis of a manager by the “Regolamento Generale dello Stabilimento dell' Acido Boracico”. In “*Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence (Italy)*”, 18-31 May 1995, Vol. I, 441-443.
- BURGASSI P.D. (1983).– Energia geotermica nelle Colline Metallifere. *Mem. Soc. Geol. It.*, **25**, 135-140.
- BURGASSI P.D. (1985).– I de Larderel e le tecniche della perforazione geotermica : studi, esperienze e lessico tra XIX e XX secolo. *Ricerche Storiche*, ed. Sci. Ital., **XV**, 3, 631-640.
- BURGASSI P.D., CATALDI R. & DONATI C. (1995).– Scientific investigations and technological development in the Larderello region from XVI through XIX Centuries. In *Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence (Italy)*, 18-31 May 1995, Vol. I, 433-440.
- BURGASSI R. & BURGASSI P.D. (1981).– I soffioni boraciferi della Toscana e le originali industrie a cui hanno dato luogo. *L'Industria Mineraria*, **2**, 13-23.
- CAROZZI A. (2000).– Manuscrits et Publications de H.B. de Saussure sur l'origine du basalte (1772-1797). Ed. Zoé, Genève.
- COQUAND H. (1848-1849).– Des solfatares, des alunières et des lagons de Toscane. *Bull. Soc. géol. France*, (2), **6**, 91-160.
- LACROIX A. (1921).– Déodat Dolomieu, membre de l'Institut national (1750-1801) : sa vie aventureuse, sa captivité, ses œuvres, sa correspondance. Libr. acad. Perrin et Cie, Paris, 2 tomes.
- MAZZONI A. (1948).– I soffioni boraciferi toscani e gli impianti della “Larderello”. *Anon. Arti graf.* ed., Bologne, 161 p. (1<sup>ère</sup> édition).
- DESMARESTS N. (1809 et 1811).– Géographie Physique in *Encyclopédie méthodique...*, Paris, H. Agasse impr., t. 3 et 4.
- LOTTI B. (1928).– I soffioni boraciferi della Toscana. *Boll. Soc. Geol. It.*, **47**, 2, 87-96.
- MASCAGNI P. (1791).– Memorie sui Lagoni.
- MICHELETTI V. (1943).– Storia interna ai Soffioni (I paesi della zona boracifera – Notice storiche). Publ. “Rassegno Larderello” ENE Larderello, Museo della Geotermia.
- NASINI P. (1930).– I Soffioni e i Lagoni della Toscana e l'Industria Boracifera. Ed. Italia, Rome.
- PALASSOU B. (1815).– Mémoires pour servir à l'histoire naturelle des Pyrénées et des pays adjacents. Impr. Vignancour, Pau, 485 p.
- PESCETTI L. (1940).– La famiglia de Larderel, conti di Montecerboli. Stabilimento Poligrafico Toscana, Livorno, 172 p.
- TARGIONI TOZZETTI G. (1769).– Relazione d'alcuni viaggi fatti in diverse parti della Toscana dal 1742 al 1751. Cambiagi, Firenze, t. XII, VII + 446 p.
- TAYLOR K.L. (1995).– Nicolas Desmarests and Italian Geology. In “Rocks, Geology and History”, ed. G. Giglia, C. Mascagni et N. Morello, Firenze, Festina Lente, 95-109.

### Références géologiques

- BARTOLE R. (1995).– The North Tyrrhenian-Northern Apennines post-collisional system: constraints for a geodynamic model. *Terra Nova*, **7**, 7-30.
- BALDI P., BELLANI S., CECCARELLI A., FIORDELISI A., SQUARCI P. & TAFFI L. (1994).– Correlazioni tra anomalie termiche ed altri elementi geofisici e strutturali della Toscana meridionale. *Studi Geologici Camerti*, Vol. Spec. 1994/1, 139-149.
- BATINI F., BERTINI G., GIANELLI G. & PANDELI E. (1983).– Deep structure of the Larderello field. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **25**, 219-235.
- BERTINI G., CAMELI G.M., COSTANTINI A., DECANDIA F.A., DINI I., ELTER F.M., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., PANDELI E. & SANDRELLI F. (1994).– Structural features of southern Tuscany along the Monti di Campiglia-Rapolano Terme cross-section. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **48**, 51-59.
- BERTINI G., GIANELLI G., PANDELI E. & PUXEDDU M. (1985).– Distribution of hydrothermal minerals in the Larderello-Travale and Mt. Amiata geothermal fields (Italy). In : Transactions of the 1985 International Symposium on Geothermal Energy held in Kailua-Kona (Hawaii), 26-30

- August 1985. Geothermal Resources Council, Davis (USA), Vol. 9, Part I, 261-266.
- BOCCALETTI M., CAPITANI S., COLI M., FORNACE G., GOSSO G., GRANDINI G., MILANO P.F., MORATTI G., NAFISSI P. & SANI F. (1983).— Caratteristiche deformative delle Alpi Apuane settentrionali. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **26**, 527-534.
- BOCCALETTI M., COLI M., EVA C., FERRARI G., GIGLIA G., LAZZAROTTO A., MERLANTI F., NICOLICH R., PAPANI G. & POSTPISCHL D. (1985).— Considerations on the seismo-tectonics of the Northern Apennines. *Tectonophysics*, **117**, 7-38.
- BOCCALETTI M., COLI M., DECANDIA F.A., GIANNINI E. & LAZZAROTTO A. (1980).— Evoluzione dell'Appennino Settentrionale secondo un nuovo modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **21**, 359-373.
- BURGASSI P.D., DECANDIA F.A. & LAZZAROTTO A. (1983).— Elementi di stratigrafia e paleogeografia nelle Colline Metallifere (Toscana) dal Trias al Quaternario. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **25**, 27-50.
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD R. (1990).— Crustal extension in the northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex. *Tectonics*, **9**, 1275-1303.
- CARMIGNANI L., DECANDIA F.A., DISPERATI L., FANTOZZI P.L., LAZZAROTTO A., LIOTTA D. & OGGIANO G. (1995).— Relationships between the Tertiary structural evolution of the Sardinia-Corsica-Provençal Domain and the Northern Apennines. *Terra Nova*, **7**, 128-137.
- DOGLIONI C., MONGELLI F. & PIALLI P. (1998).— Boudinage of the Alpine Belt in the Apenninic back-arc. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **52**, 457-468.
- ELTER F.M. & PANDELI E. (1990).— Alpine and Hercynian Orogenic phases in the Basement rocks of the Northern Apennines (Larderello Geothermal field, Southern Tuscany, Italy). *Eclogae Geol. Helv.*, **83/2**, 241-264.
- ELTER F.M. & PANDELI E. (1993).— Alpine tectono-metamorphic framework of the Tuscan Paleozoic (Southern Tuscany, Italy). *Annales Tectonicae*, **7**, 71-84.
- ELTER F.M. & PANDELI E. (1996).— Structural setting of the Paleozoic crystalline basement of the Northern Apennines (Italy). In: O. Oncken & C. Janssen (Eds.)- Proceedings of the Eleventh International Conference on Basement Tectonics «Basement Tectonics 11-Europe and other regions» held in Potsdam, Germany, July 1994-Kluwer Academic Publishers Dordrecht/Boston/London, 79-90.
- ELTER P., GIGLIA G., TONGIORGI M. & TREVISAN L. (1975).— Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to present) evolution of the Northern Apennines. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, **42**, 3-18.
- FAZZUOLI M., PANDELI E. & SANI F. (1994).— Considerations on the sedimentary and structural evolution of the Tuscan Domain since Early Liassic to Tortonian. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **48**, 31-50.
- GIANELLI G. & CALORE C. (1996).— Models for the origin of carbon dioxide in the Larderello geothermal field. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **115**, 75-84.
- GIANNINI E. & LAZZAROTTO A. (1975).— Tectonic evolution of the Northern Apennines. In : Geology of Italy. P.E.S.L., Libia, 237-287.
- JOLIVET L., FACCENA C., GOFFÉ B., MATTEI M., ROSSETTI F., BRUNET F., STORTI F., FUNICELLO R., CADET J.P., D'AGOSTINO N. & PARRA T. (1998).— Midcrustal shear zones in postorogenic extension: Example from the Northern Tyrrhenian Sea. *J. Geophysical Research*, **103**, 123-160.
- KELLER J.V.A., MINELLI G. & PIALLI G. (1994).— Anatomy of late orogenic extension: the Northern Apennines case. *Tectonophysics*, **238**, 275-294.
- LA VECCHIA G. (1988).— The Tyrrhenian-Apennines system: structural setting and seismotectogenesis. *Tectonophysics*, **147**, 263-296.
- MANZELLA A., RUGGIERI G., GIANELLI G. & PUXEDDU M. (1998).— Plutonic-geothermal system of southern Tuscany: a review of the crustal models. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **52**, 283-294.
- MARTINI I.P. & SAGRI M. (1993).— Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines, Italy. *Earth-Science Reviews*, **34**, 197-233.
- MINELLI G., PIALLI G. & SCARASCIA S. (1991).— Revisione dei profili crostali nell' area dell' Appennino settentrionale interessata dal profilo CROP 03. *Studi Geologici Camerti*, Vol. Spec. 1991/1, 55-64.
- MINISSALE A. (1991).— The Larderello geothermal field: a review. *Earth-Sciences Reviews*, **31**, 133-151.
- MONGELLI F. & ZITO G. (1991).— Flusso di calore nella regione toscana. *Studi Geologici Camerti*, Vol. Spec. CROP 03, 1991/1, 91-98.
- MONGELLI F., PALUMBO F., PUXEDDU M., VILLA I.M. & ZITO G. (1998).— Interpretation of the geothermal anomaly of Larderello. Italy. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **52**, 305-318.
- MORELLI C. (1998).— Lithospheric structure and geodynamics of the Italian peninsula derived from geophysical data: a review. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **52**, 113-122.
- PANDELI E., BERTINI G. & CASTELLUCCI P. (1991).— The Tectonic Wedges Complex of the Larderello area (Southern Tuscany - Italy). *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **110**, 621-629.
- PANDELI E., GIANELLI G., PUXEDDU M. & ELTER F.M. (1994).— The Paleozoic basement of the Northern Apennines: stratigraphy, tectono-metamorphic evolution and Alpine hydrothermal processes. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **48**, 627-654.
- PRINCIPI G. & TREVES B. (1984).— Il sistema Corso-Appenninico come prisma di accrezione. Riflessi sul problema generale del limite Alpi-Appennini. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **28**, 549-576.
- SERRI G., INNOCENTI F. & MANETTI P. (1993).— Geochemical and petrological evidence of the subduction of delaminated Adriatic continental lithosphere in the genesis of the Neogene-Quaternary magmatism of central Italy. *Tectonophysics*, **223**, 117-147.
- SESTINI, G., ed. (1970).— Development of the Northern Apennines geosyncline, *Sedim. Geol.*, **4**, 205-649.
- TANELLI G. (1983).— Mineralizzazioni metallifere e minerogenesi della Toscana. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **25**, 91-109.
- VILLA I. & PUXEDDU M. (1994).— Geochronology of the Larderello geothermal field: new data and the "closure temperature " issue. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **315**, 415-426.