

# **Nouvelle Calédonie et AEFÉ**

**Durée de l'épreuve : 4h**

Le sujet se compose de trois exercices notés sur dix points chacun. Il comporte de nombreux documents, mais leur exploitation et les réponses attendues sont courtes.

La calculatrice est autorisée.

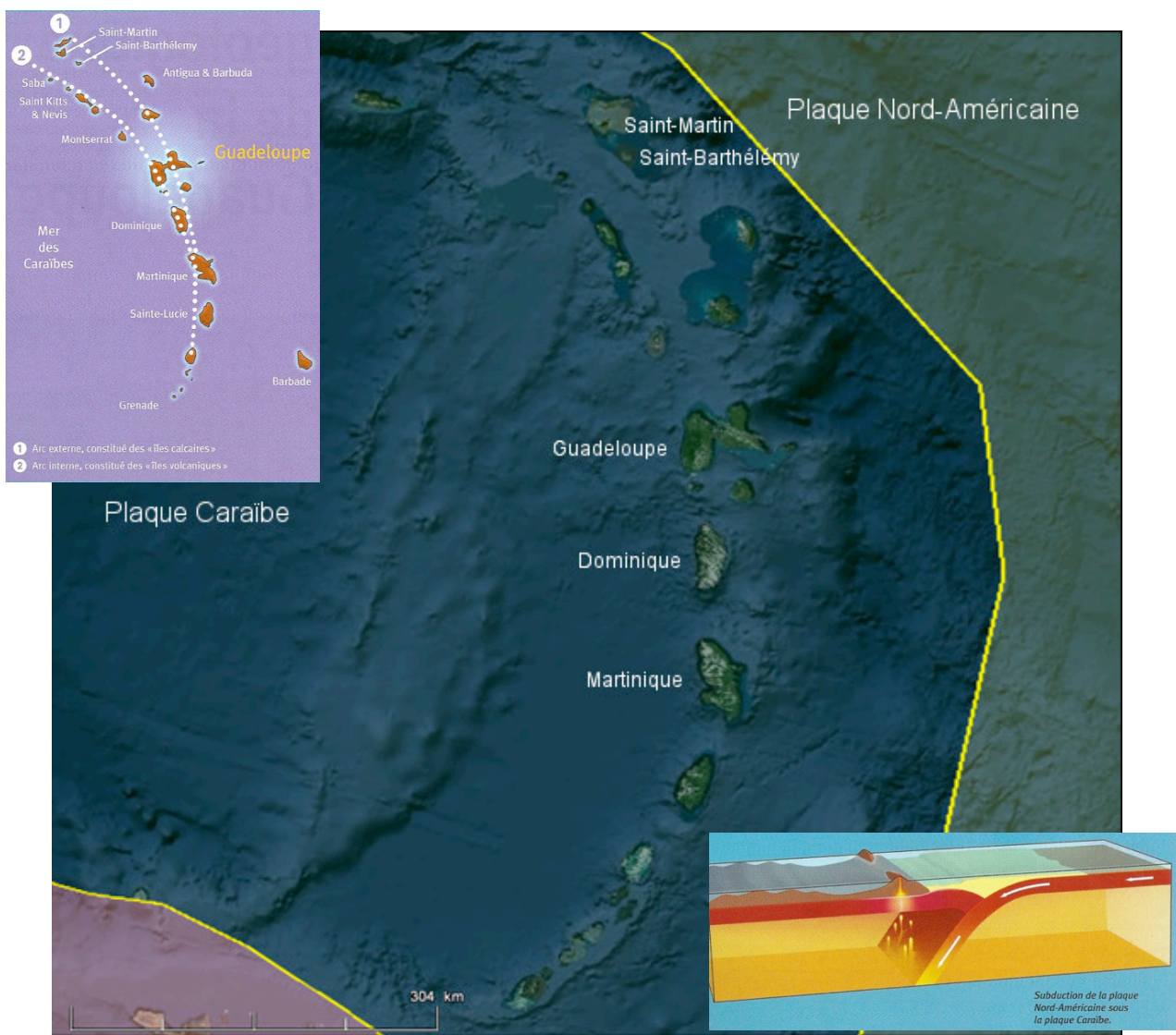
# Exercice 1 – La géothermie de Bouillante en Guadeloupe

Les îles volcaniques de l’Outre-mer, du fait de leur insularité, sont confrontées à la fragilité de leur système énergétique et de leur environnement. Étant donné la demande croissante en électricité et l’augmentation du prix des hydrocarbures, ces territoires voient s’envoler leur facture énergétique. Cas unique en France et dans la Caraïbe, la centrale géothermique haute température de Bouillante présente deux unités de production totalisant, aujourd’hui, une capacité de 15 mégawatt, soit 6 % de la demande en électricité de l’île.

La Guadeloupe présente une grande diversité de sites géologiques remarquables. L’histoire géologique de cette île commence il y a près de 150 millions d’années.

La Guadeloupe fait partie des petites Antilles, composées d’une vingtaine d’îles volcaniques, dessinant une structure arquée qui s’étend sur près de 850 kilomètres de long. Cette structure est constituée de deux arcs confondus dans la partie sud mais distinctement individualisés à partir de la Dominique. Cette structure résulte de la subduction de la plaque océanique Nord-Américaine sous la plaque Caraïbe.

**Dans ce contexte géodynamique, comment exploiter cette source de chaleur pour la convertir en électricité ?**



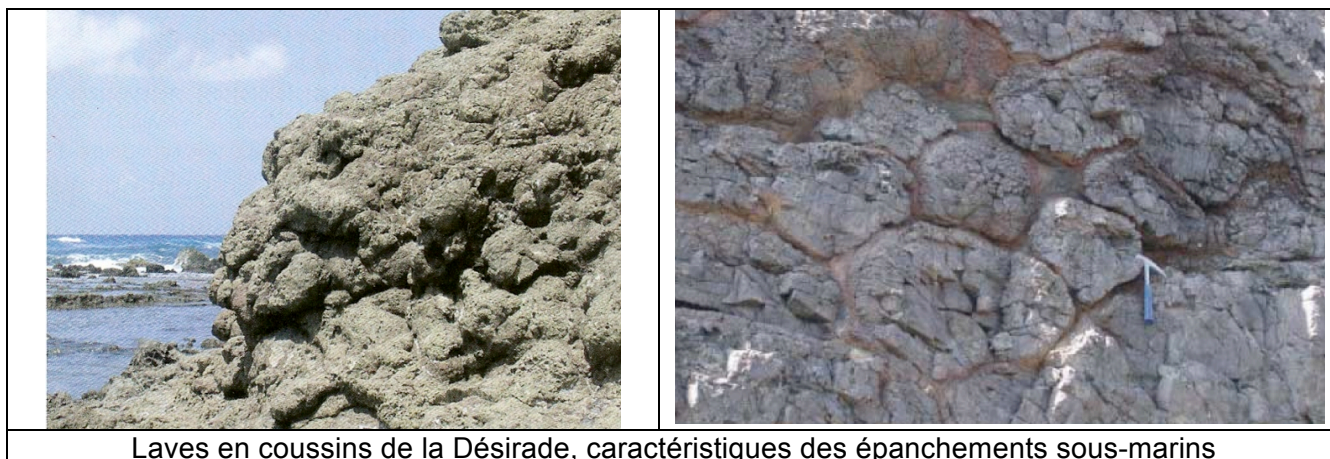
**Carte Google Earth avec limites de plaques et encart du contexte de subduction**  
(Source encarts : *Curiosités géologiques de la Guadeloupe*, édition BRGM)

## Document 1 : Carte géologique simplifiée de la Guadeloupe avec géolocalisation des sites géologiques remarquables



## Document 2 : Les coulées de lave de la Désirade

(Source : Inventaire des sites géologiques remarquables de la Guadeloupe, BRGM, décembre 2003)




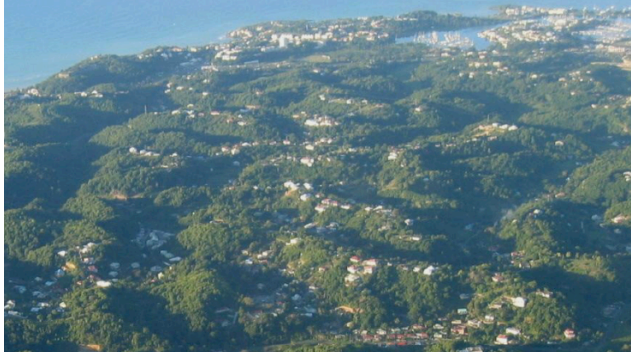
Laves en coussins de la Désirade, caractéristiques des épanchements sous-marins

Situé à l'extrémité la plus orientale de la Désirade, le site montre des coulées superposées de lave basaltique en coussins (pillow-lavas) alternant avec des dépôts de radiolarites. Ces pillow-lavas sont caractéristiques des épanchements sous-marins et se forment lorsque la lave brûlante, arrivant au contact de l'eau beaucoup plus froide, se fige pour constituer d'énormes gouttes dont l'allure générale peut rappeler celle de coussins. Quant aux radiolarites, elles résultent d'une accumulation de micro-organismes à test siliceux, les radiolaires, sur les fonds océaniques.

Ces coulées basaltiques et ces radiolarites sont datées du début du Jurassique supérieur, il y a environ 150 Ma (millions d'années). Ce site représente un fragment de croûte océanique, déplacé vers la surface lors de la subduction (enfouissement) de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe.

### Document 3 : Pointe de la Grande Vigie et Grands Fonds à Grande-Terre



(Source : Inventaire des sites géologiques remarquables de la Guadeloupe, BRGM, décembre 2003 et Curiosités géologiques de la Guadeloupe, édition BRGM)

	
Région de la pointe de la Grande-Vigie (pointe Petite Tortue) au nord de Grande-Terre	Régions des Grands Fonds au sud de Grande-Terre

Grande-Terre et Marie-Galante sont surtout constitués de roches calcaires datées de -2,5 Ma pour les plus récentes à -5 Ma pour les plus anciennes. Ces dernières reposent sur un socle volcanique provenant d'une activité magmatique de subduction. Le premier arc volcanique (voir carte page 1) se serait formé vers -100 Ma. L'arrêt, il y a environ 30 millions d'années, de l'activité volcanique de ce premier arc provoque l'immersion de l'île : la croûte qui forme le soubassement refroidit progressivement, devient plus dense et s'affaisse au cours du temps, alors qu'en surface, l'altération et l'érosion ont déjà adouci le relief. Ces premières terres s'enfoncent ainsi graduellement et leur socle volcanique se recouvre de sédiments calcaires d'origine marine, il y a 5 millions d'années (Pliocène) comme en témoignent les falaises calcaires de la pointe de la Grande Vigie ou de la région des Grands Fonds respectivement au nord et au sud de Grande-Terre. Des mouvements tectoniques globaux de l'arc antillais entraînent la ré-émersion des hauts fonds sédimentaires de l'arc externe au Pléistocène inférieur (-2,5 Ma) pour constituer les « îles calcaires ».

### Document 4 : L'activité volcanique ancienne

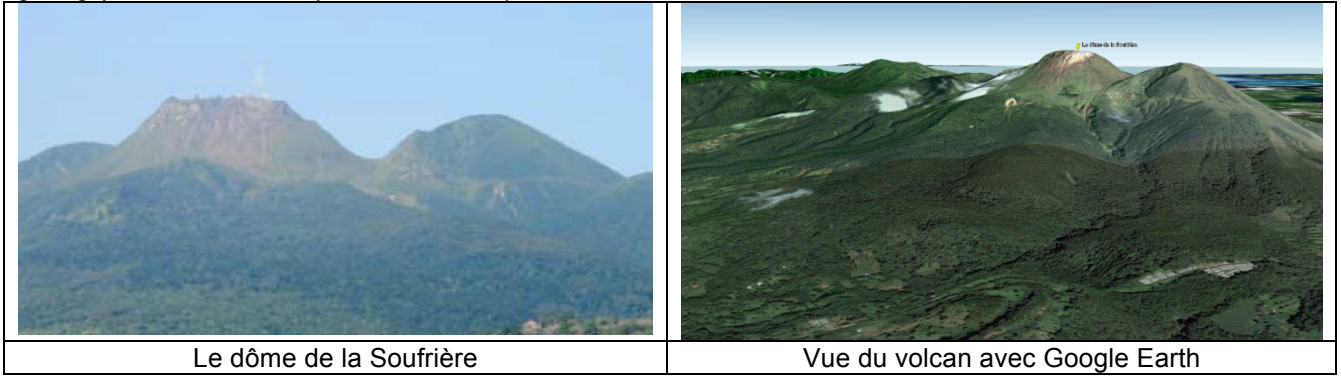
(Source : Inventaire des sites géologiques remarquables de la Guadeloupe, BRGM, décembre 2003 et Curiosités géologiques de la Guadeloupe, édition BRGM)

	
Vue aérienne de la face nord de Pain de Sucre aux Saintes	Mamelle de Petit-Bourg au nord de Basse-Terre

Il y a une vingtaine de millions d'années (Miocène inférieur), alors qu'à l'est les dépôts sédimentaires masquent les témoins de l'activité volcanique ancienne de l'arc externe, cette activité reprend plus à l'ouest pour constituer un nouvel arc, plus interne. L'activité au sein de cet arc interne est à l'origine des Saintes et de la Basse-Terre. Ce volcanisme aurait débuté aux Saintes il y a près de 5 millions d'années, puis plus récemment dans le nord de la Basse-Terre. L'activité s'est alors poursuivie il y a 1 million d'années dans les parties intermédiaires de l'île, puis plus au sud.

### Document 5 : L'activité volcanique récente

(Source : Inventaire des sites géologiques remarquables de la Guadeloupe, BRGM, décembre 2003 et Curiosités géologiques de la Guadeloupe, édition BRGM)



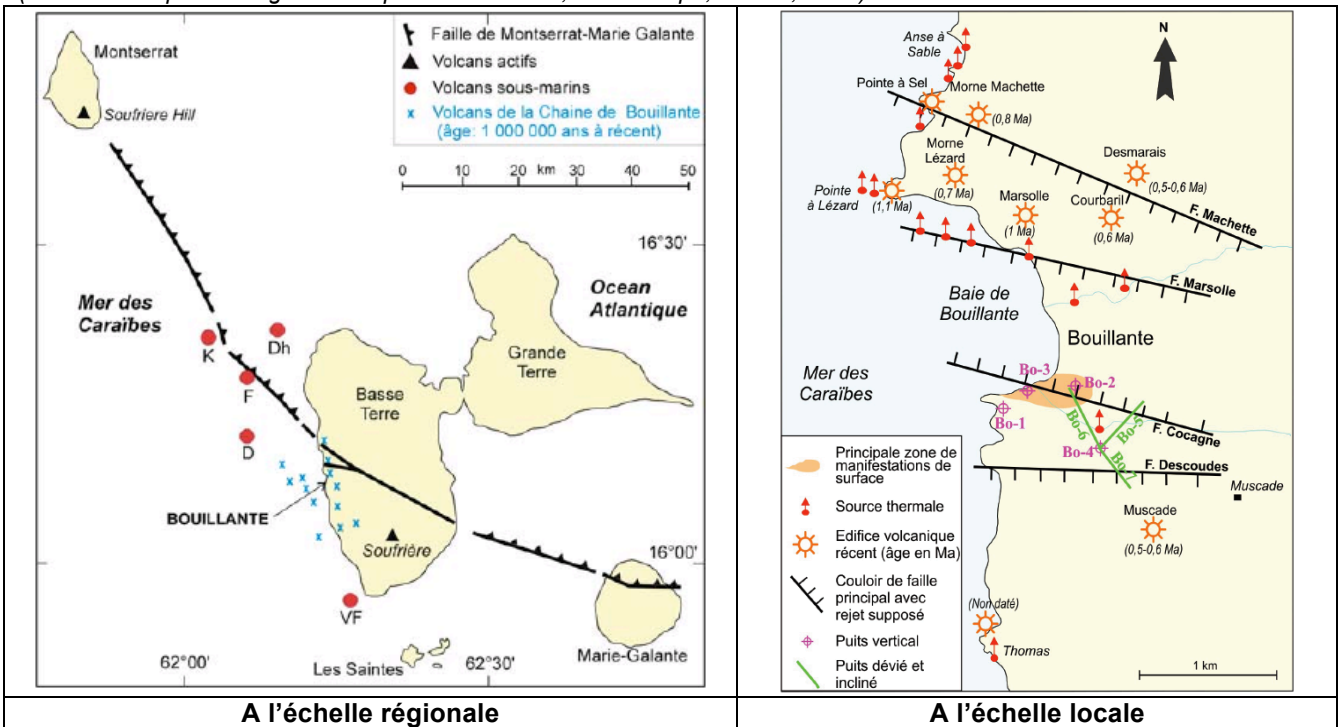
Le dôme de la Soufrière

Vue du volcan avec Google Earth

Depuis 200 000 ans, le volcanisme s'est concentré dans la partie sud de la Basse-Terre, donnant naissance au complexe toujours actif de la Grande-Découverte. Avec près de 10 kilomètres de diamètre, c'est lui qui va servir d'assise au dôme proprement dit de la Soufrière actuelle. Aujourd'hui, cet édifice est toujours en activité, la dernière éruption ayant eu lieu en 1976.

### Document 6 : L'origine de l'anomalie géothermique de Bouillante

(Source : L'exploitation géothermique de Bouillante, Guadeloupe, BRGM, EDF.)

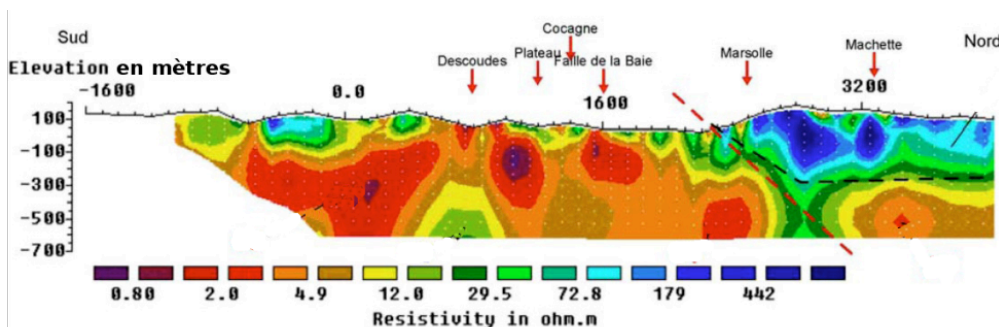


A l'échelle régionale

A l'échelle locale

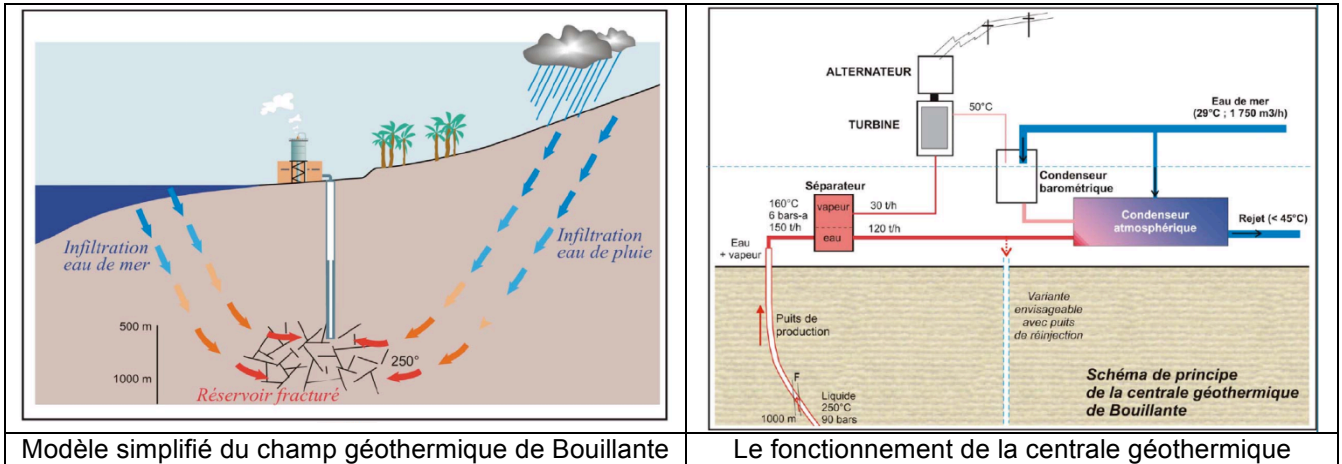
### Document 7 : Modèle de résistivité selon une coupe Nord Sud (Source : Fabriol et al, 2005)

Les zones avec une forte résistivité indiquent des terrains qui ne sont pas fortement altérés. Les zones avec une faible résistivité indiquent les terrains préférentiels où circulent les fluides (roches très altérées) voire représentent la prolongation des failles en profondeur.



## Document 8 : Principe de fonctionnement de la centrale géothermique haute température

(Source : L'exploitation géothermique de Bouillante, Guadeloupe, BRGM, EDF.)



### Questions :

#### 1°) Documents 1 à 5 : l'histoire géologique de la Guadeloupe

En vous appuyant sur des observations de terrain (documents 1 à 5), replacer dans l'ordre chronologique en les datant les quatre schémas suivants illustrant les grandes étapes de l'histoire géologique de la Guadeloupe.

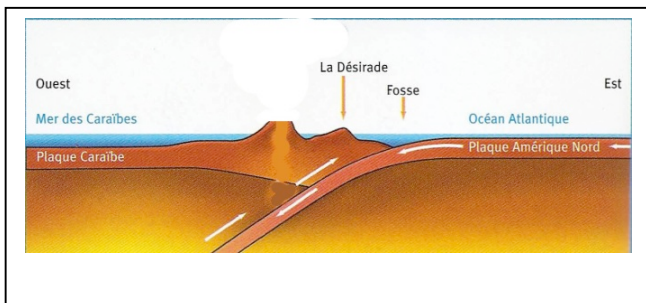


Schéma A

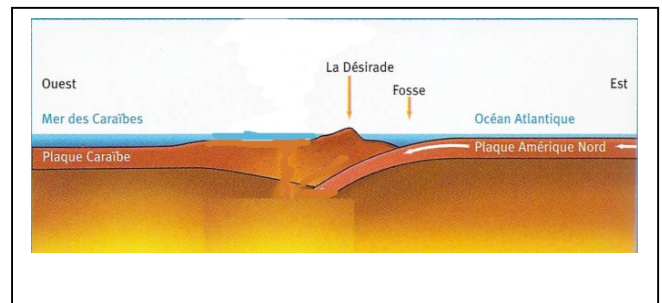


Schéma B

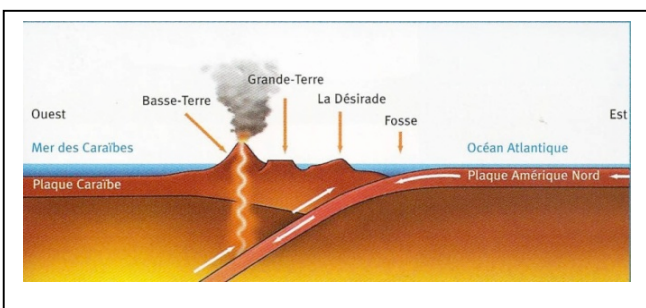


Schéma C

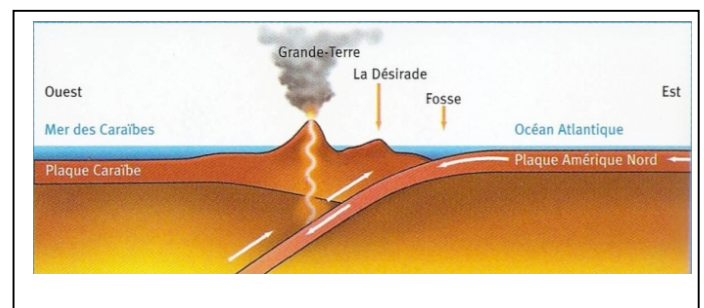


Schéma D

#### 2°) Documents 6 à 8 : la géothermie de Bouillante

A l'aide des documents 6 à 8, expliquer pourquoi la région de Bouillante a été choisie pour installer l'usine géothermique de haute température sachant que la présence de gisements d'énergie géothermique haute température nécessite :

- l'existence d'une source de chaleur à quelques kilomètres de profondeur, due à une activité volcanique récente (moins de 500 000 ans) ;
- une perméabilité élevée du sous-sol, généralement liée à la présence de failles ;

– une disponibilité d'eau de surface (eau météorique, mer) capable de s'infiltrer dans le sous-sol, circuler en profondeur et se réchauffer au contact des roches portées à haute température ;

**3°) Un projet « Bouillante 3 » est en cours d'élaboration ; avec de nouveaux puits, la future usine géothermique pourrait produire plusieurs dizaines de mégawatt !**

En argumentant votre choix, proposer un emplacement à l'échelle locale pour réaliser les puits verticaux de Bouillante 3.



## Exercice 2 : or noir au pays de l'Auriverde

Après l'acquisition de l'ancien porte avion français « Foch », le gouvernement brésilien souhaite poursuivre le renforcement de son arsenal militaire maritime par l'achat de cinq sous-marins et de neuf frégates. Il cherche en effet à accroître la protection de ses champs d'exploitation pétrolière en mer.

Pour justifier la pertinence de tels investissements, le gouvernement brésilien charge la société Petrobras de localiser d'éventuels gisements et d'en évaluer les perspectives d'exploitation pétrolière.

**Document 1** : classement 2009 des pays producteurs de pétrole (en milliers de barils par jour)

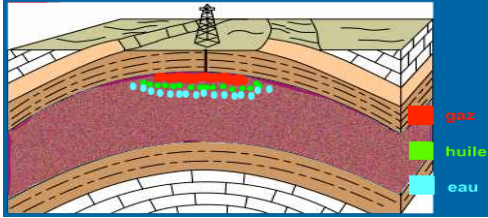
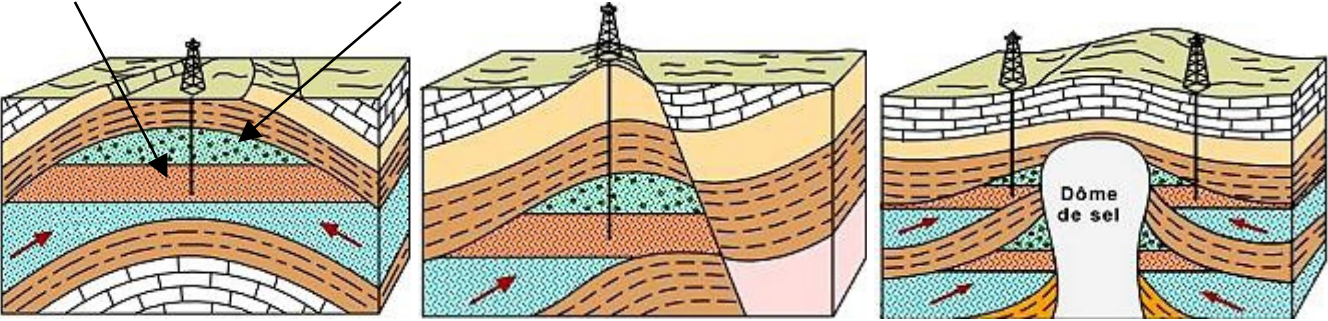
D'après: <http://www.fondssouverains.com/article-31442172.html>

1	Russie	10 248
2	Arabie Saoudite	9 874
3	Etats-Unis	8 457
4	Iran	4 034
5	Chine	3 912
6	Canada	3 422
7	Mexique	3 500
8	Émirats Arabes Unis	2 948
9	Venezuela	2 670
10	Koweït	2 616
13	Brésil	2280

**Document 2**: le mode de formation des gisements d'hydrocarbures

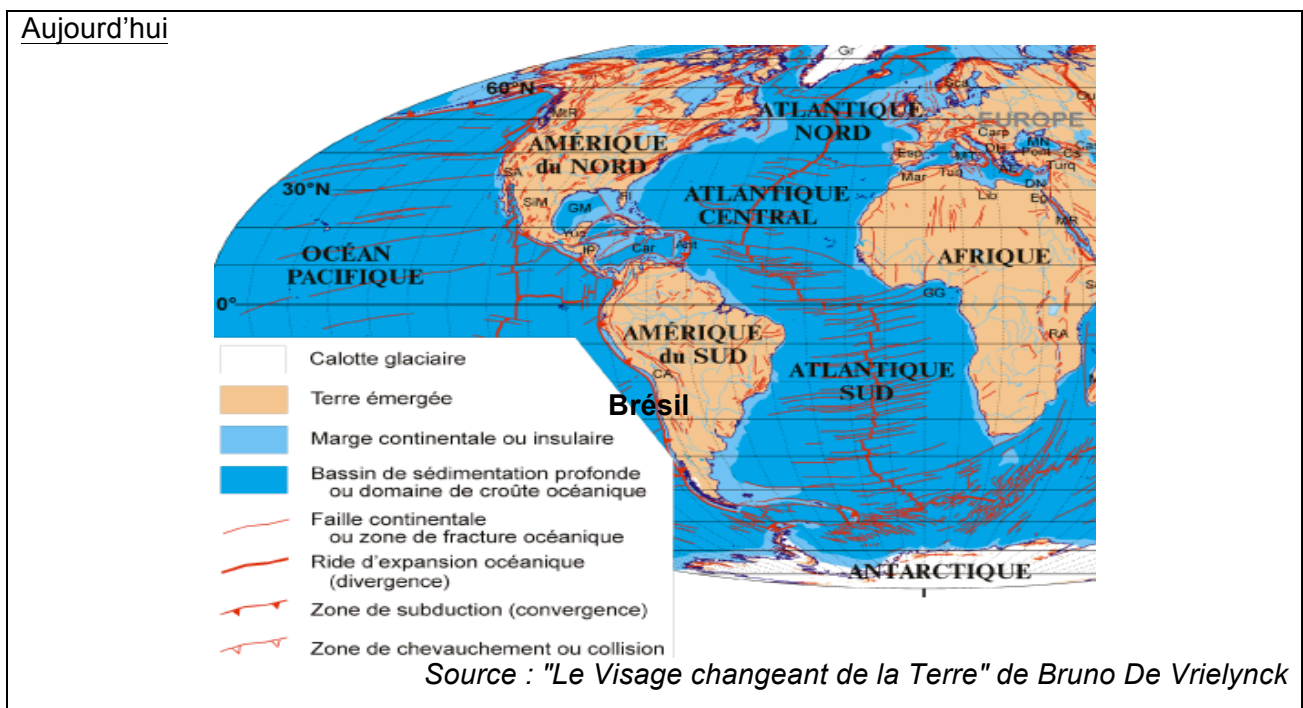
<b>Matière à l'origine des hydrocarbures</b>	<i>Sédiments issus de l'érosion des continents (éléments minéraux + matière organique) et organismes océaniques planctoniques morts</i>	
<b>Modalités d'accumulation</b>	<i>Transports par les eaux continentales + sédimentation océanique sur les marges continentales (bassins sédimentaires)</i>	
<b>Contexte géologique</b>	<i>Lagunes, deltas, marges passives avec blocs fracturés (rifting initial) permettant une accumulation sédimentaire avec enfouissement (= subsidence) Positionnement des continents empêchant la circulation océanique thermohaline (pas de communication avec les eaux polaires) donc l'oxygénation des eaux océaniques</i>	
<b>Conditions biologiques de transformation</b>	<i>Peu de dioxygène et de dégradation respiratoire par des micro organismes ==&gt; fermentation anaérobie lente de la matière organique riche en C, O, H et N ==&gt; élimination des éléments O et N</i>	<p>Profondeur</p> <p>0 m : MATIÈRE ORGANIQUE C-H-O-N</p> <p>1000 m : KÉROGÈNE</p> <p>2000 m : HUILE</p> <p>3000 m : GAZ H-C</p> <p>4000 m : RÉSIDU DE CARBONE C</p> <p>températures : 60° à 130°</p> <p>HYDROCARBURES GÉNÉRÉS</p>
<b>Conditions physico-chimiques de transformation</b>	<i>Sédimentation superposée et subsidence ==&gt; enfouissement et enfouissement ==&gt; accroissement de température et de pression sur les sédiments ==&gt; élimination de l'eau (compaction) et transformation de la matière organique résiduelle en kérogène.</i>	



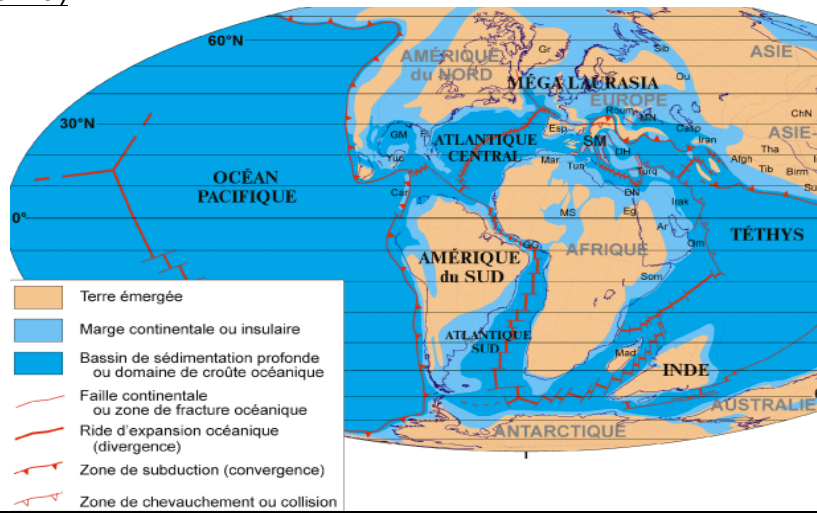
<p><b>Devenir et évolution des hydrocarbures formés</b></p>	<p>Formation des hydrocarbures liquides et gazeux dans une roche appelée roche mère. Puis migration vers la surface selon leur densité (superposition eau résiduelle, pétrole et gaz) dans des roches perméables et poreuses appelées roches réservoirs.</p>	
<p><b>Conditions géologiques de formation de gisement</b></p>	<p>La migration vers la surface s'arrête lorsque les hydrocarbures rencontrent une roche couverture imperméable. Des structures géologiques sont favorables à cette accumulation d'hydrocarbures (blocs effondrés des failles normales, plis en cloche avec couverture imperméable, dépôts salins en dôme), illustrées ci-dessous de A à C.</p>	
 <p>A - Piège structural : anticlinal      B - Piège structural : faille normale diapir      C - Pièges mixtes associés à un diapir</p>		

<http://www.planete-energies.com/fr>

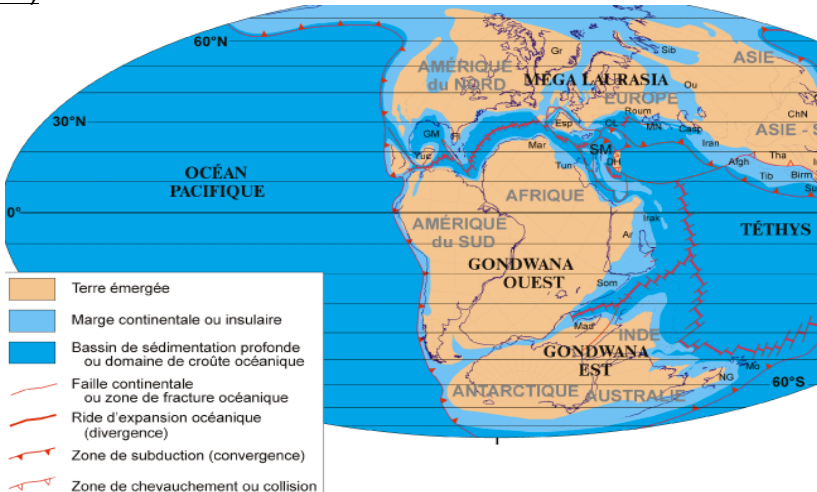
**Document 3:** le contexte géologique du Brésil au cours du temps



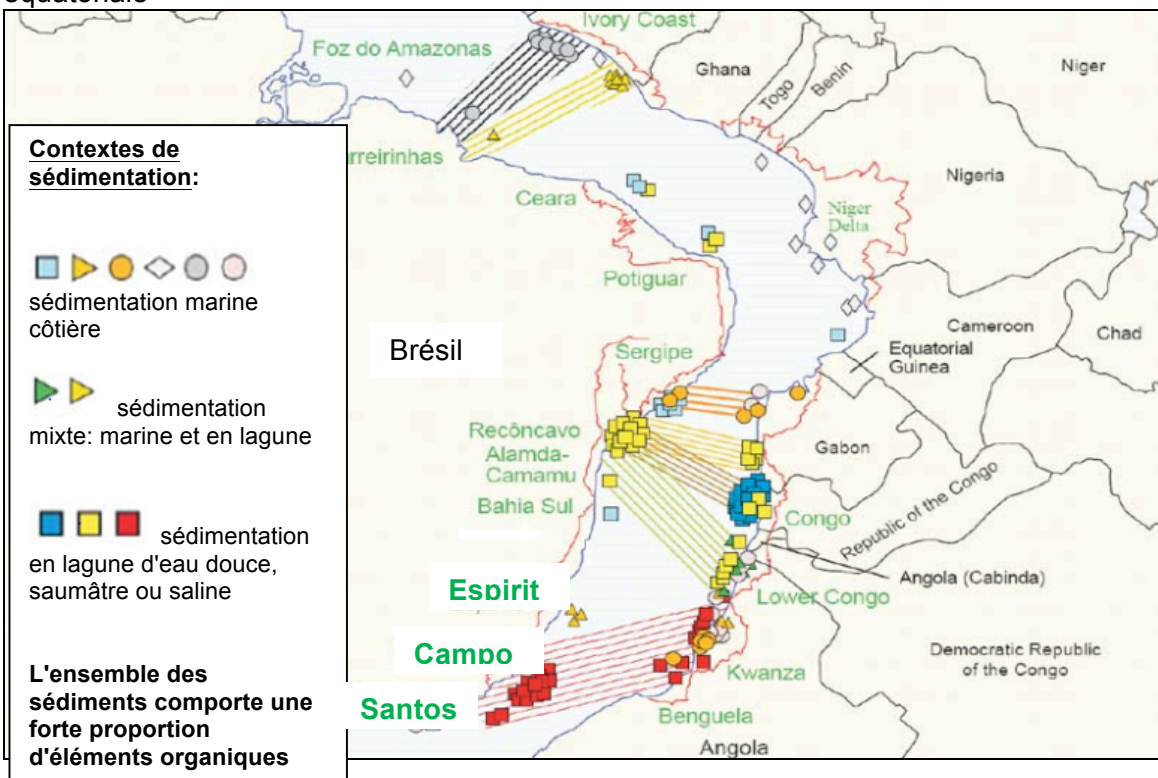
**Cénomaniens (-95 Ma)**



**Tithonien (-140 Ma)**

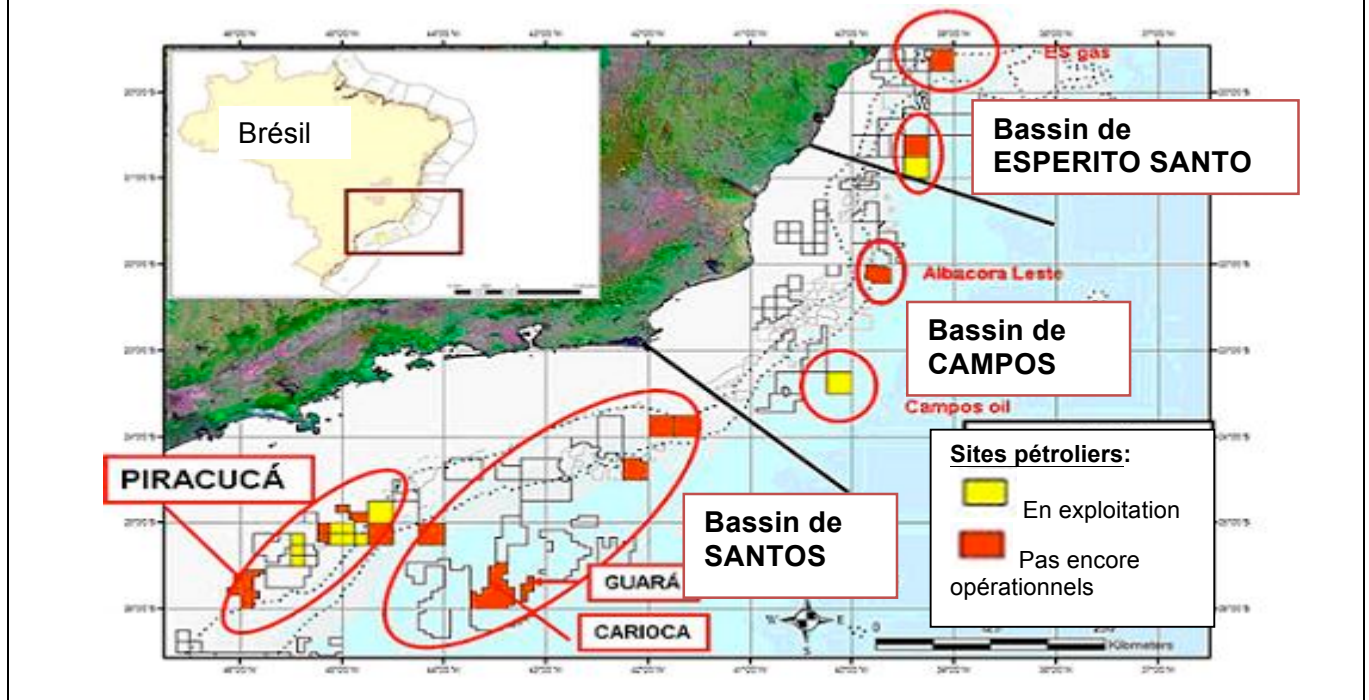


**Document 4 :** A - reconstitution du contexte géologique de la sédimentation à la fin du Secondaire (vers - 100 Ma) dans le pré-océan Atlantique. Mise en parallèle des marges brésilienne et d'Afrique équatoriale



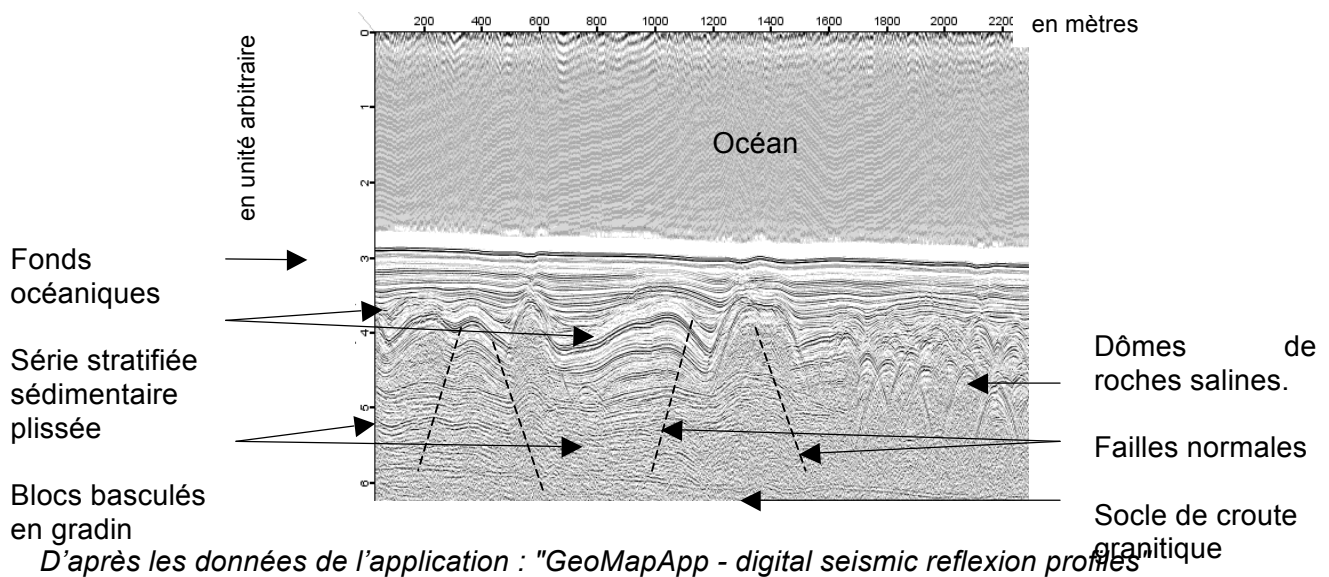
B - les premières zones d'étude déterminées par la société Petrobras

La réserve de pétrole du gisement du bassin de Santos est estimée à elle seule, à un total de 20 milliards de barils.  
 La compagnie Pétrobras prévoit une production pour ce gisement de 5 millions de barils par jour à l'orée de 2020.

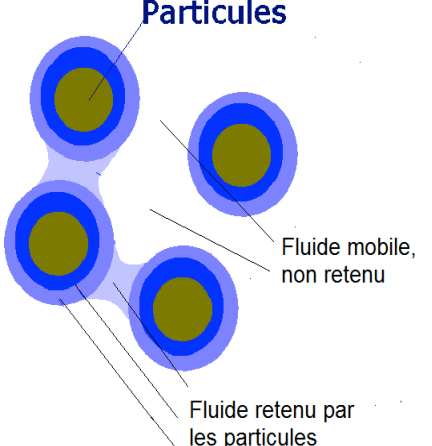


**Document 5** : recherche d'un contexte géologique favorable à la formation de gisements d'hydrocarbures: les marges passives de l'océan Atlantique sud tropical du Brésil

Profil sismique de la marge passive brésilienne



## Document 6 : Étude de propriétés géophysiques de quelques roches

<p>- La porosité efficace correspond à la proportion de fluide mobile libérable par la roche</p> <p>- La perméabilité d'une roche correspond à la vitesse de déplacement d'un fluide, ou percolation, au travers de la roche.</p> <p>Expérimentalement, il est possible de mesurer le débit de liquide qui traverse l'échantillon (en mL par seconde)</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Echantillons de roches:	roches sédimentaires non argileuses	roches sédimentaires argileuses
Porosité efficace (%)	15 à 25	1,5
Perméabilité (m/jour)	10 à 100	0,1

### Questions

**1. A l'aide des documents, indiquer :**

- 1.1. le contexte géologique favorable à la formation de gisements pétroliers qui est rencontré au Brésil,
- 1.2. la période de formation de la marge passive brésilienne.

**2. A partir des données économiques du premier document et des estimations des réserves du bassin de Campos du document 4, confirmer les perspectives favorables de l'exploitation pétrolière offshore brésilienne.**

- 2.1. Quelle est l'estimation de l'espérance de durée d'exploitation du bassin de Santos si l'on se base sur la productivité prévue en 2020 ?
- 2.2. Quel rang des pays producteurs de pétrole pourrait atteindre le Brésil durant la prochaine décennie grâce à l'exploitation du bassin de Campos, si la production des autres pays ne change pas ?

**3. A partir des éléments de réponse précédents complétés éventuellement par d'autres informations fournies par les documents, rédiger un rapport argumenté répondant à la commande du gouvernement brésilien à la société Petrobras.**

## Exercice 3 : Les cratères sans racine, des indicateurs de la quantité d'eau sur Mars ?

Les « cratères sans racine » sont des édifices volcaniques qui ne sont pas directement connectés à une chambre magmatique, d'où leur dénomination « sans racine ». Leur étude permettrait de donner des indices sur la quantité d'eau liquide présente dans le passé sur Mars.

### Document 1a : images satellites d'un secteur de la surface de Mars et d'Islande

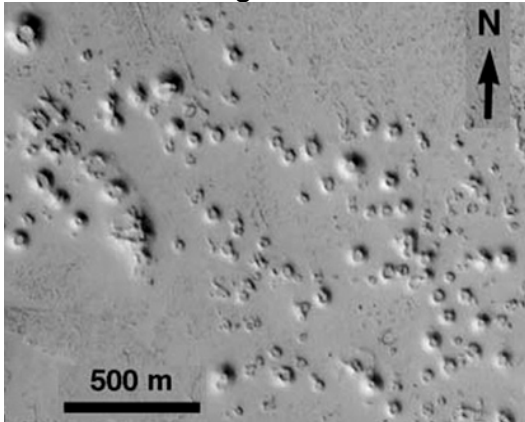


Image satellite de la surface de Mars  
(Amazonis Planitia)

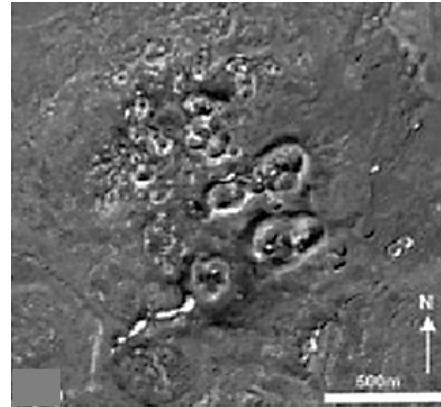
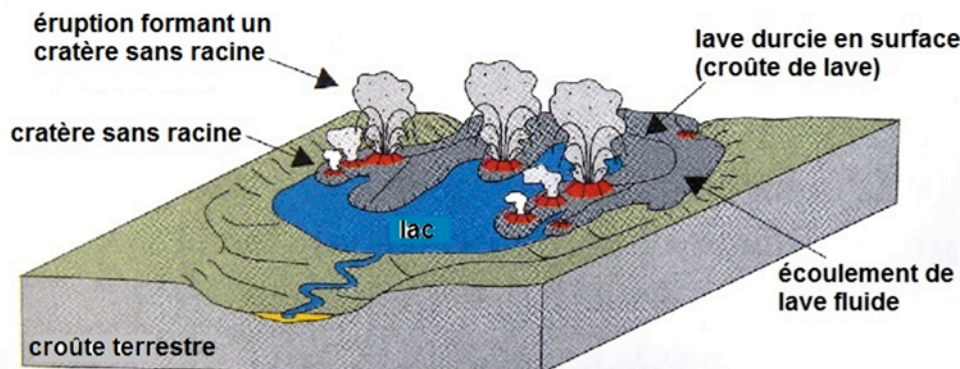


Image satellite de cratères sans racine  
islandais (Laki)

(D'après Sargent et Thodarsen, 2007)

### Document 1b : schéma de la formation d'un champ de cratères sans racine terrestre

Un champ de cratères sans racine se forme quand une coulée de lave se déverse dans un lac.



(D'après Sargent et Thodarsen, 2007)

### Document 1c : photographie aérienne du lac Myvatn (Islande)

Une coulée de lave s'est déversée dans le lac Myvatn induisant la formation d'un champ de cratères sans racine.

(D'après le National Geographic)



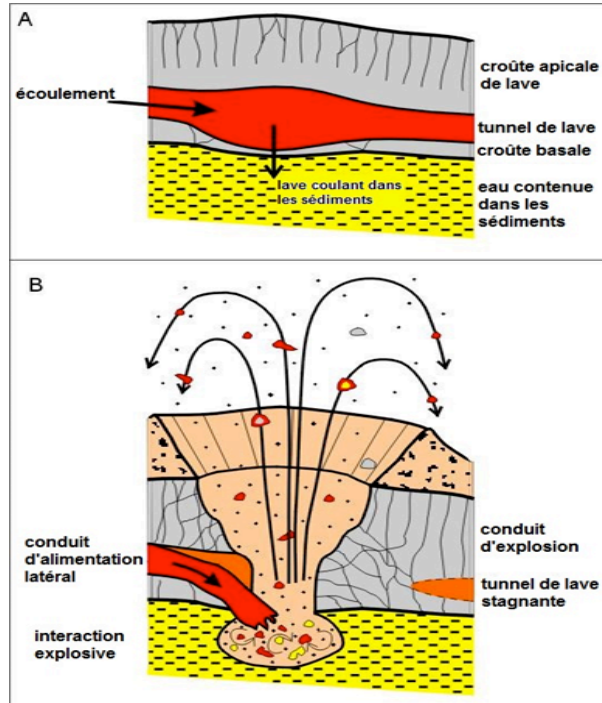
Photograph by Jonas Bendixsen

Iceland's Heated Debate  
National Geographic, March 2008  
© 2008 National Geographic Society. All rights reserved.

**Document 2 : schéma du processus de formation d'un cratère sans racine**

Quand une coulée progresse sur un terrain, la lave rencontre à certains endroits des sédiments qui contiennent de l'eau. Cette rencontre provoque la vaporisation brutale de l'eau conduisant à de fortes explosions et à la projection de fragments de lave qui, en s'accumulant, forment un édifice volcanique : un cratère sans racine.

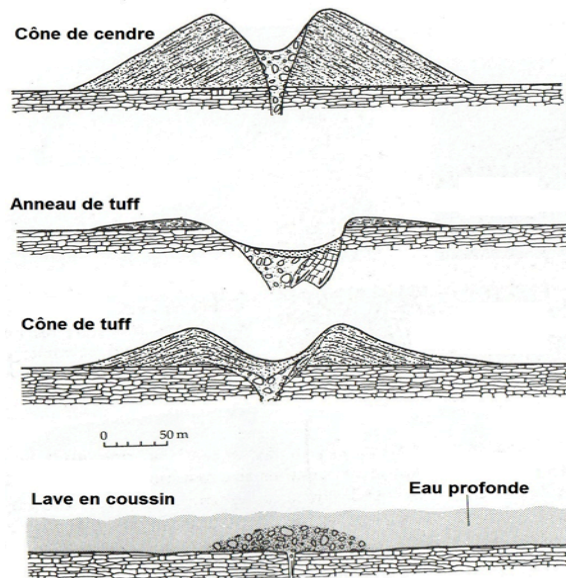
(D'après Bruno et al. 2004)



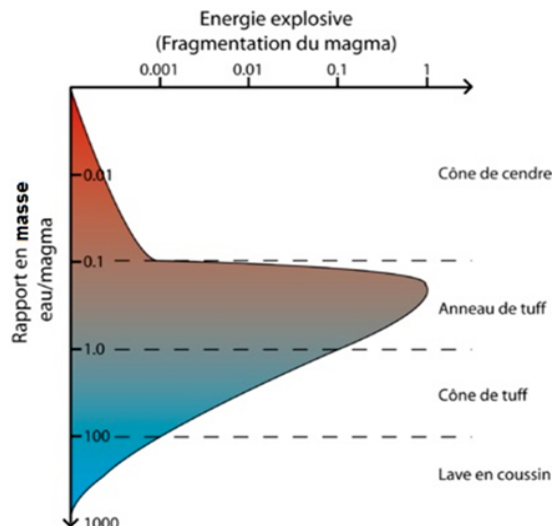
**Document 3 : schémas des différents édifices volcaniques issus de la rencontre entre eau et magma**

NB – Tuff = roche résultant de la consolidation, sous l'action de l'eau, de débris volcaniques de taille généralement inférieure à 4 mm.

(D'après Francis et Oppenheimer, 2004)



**Document 4 : graphique de l'énergie explosive en fonction du rapport en masse eau/magma lors d'une éruption issue de la rencontre entre un magma et de l'eau**



**Document 5 : données complémentaires**

Après une éruption, on peut mesurer les dimensions d'une coulée de magma et retrouver ainsi le volume de magma émis. La masse volumique du magma sur Terre est comprise entre 2000 et 3000 kg/m<sup>3</sup>.

**Questions :**

à l'aide des documents,

**1 Expliquer comment se forment les cratères sans racine.**

**2 Montrer comment, sur Terre, l'étude de leur forme permet d'évaluer la quantité d'eau impliquée dans ces éruptions.**

**3 Préciser, en les justifiant, les informations qui seraient à collecter lors d'une éventuelle campagne d'exploration de la zone martienne photographiée par satellite (Amazonis Planitia) afin de déterminer la quantité d'eau éventuellement impliquée lors de la formation de cratères sans racine.**