

PROJET JILL

INITIATIVE CLIMATIQUE

Projet JILL

— *Dossier technique* —

◆ ◆ ◆

Un répit climatique temporaire inspiré des hivers volcaniques : hypothèse, état des connaissances, risques et feuille de route

Document de présentation scientifique et technique

Nassim Anane

Fondateur du Projet JILL · Oran, Algérie

Novembre 2026

nassim.anane@gmail.com · www.projetjill.com

Document de travail destiné à l'examen scientifique. Il présente une hypothèse de recherche, et non une méthode démontrée ni un projet prêt à être exécuté.

Avant-propos

Le Projet JILL porte le prénom de ma fille. Il est né d'une question simple : si la nature a déjà refroidi la planète pendant quelques années après certaines grandes éruptions, peut-on comprendre ce mécanisme assez bien pour en tirer, un jour, un répit utile, le temps que l'humanité réduise ses émissions et apprenne à retirer le carbone de l'air ?

Ce dossier présente l'hypothèse du projet, ce que la science en sait aujourd'hui, l'état réel des techniques, les risques, la feuille de route et un budget préliminaire. Il s'adresse aux chercheurs, aux partenaires et aux financeurs qui voudront l'examiner. Le projet est aussi raconté dans le livre *Projet JILL* (Nassim Anane) [1].

La méthode du projet : trois tiroirs, jamais mélangés

- **Ce qu'on a vu, on le dit** (VU) : fait mesuré, publié et référencé (numéro entre crochets, voir « Références »).
- **Ce qu'on suppose, on l'avoue** (SUPPOSÉ) : hypothèse ou conviction du projet, non démontrée.
- **Ce qu'on ignore, on le cherche** (IGNORÉ) : question à laquelle personne ne sait répondre aujourd'hui.

Le Projet JILL n'est **pas** une solution au changement climatique. Le voile « ne retirerait pas un gramme de carbone de l'air ». Il ne doit jamais servir de prétexte pour retarder la baisse des émissions.

Le mot du fondateur

« Je ne suis pas scientifique. Je suis un père. »

« Je ne demande pas qu'on me croie. Je demande qu'on vérifie. Si la réponse est non, je voudrais qu'on me le dise, mesures à l'appui. »

Sommaire

Résumé exécutif 4
1. Le siège de la chaleur : contexte climatique 6
2. Ce que les volcans nous ont appris 8
3. L'eau et le feu 10
4. Le vent des hauteurs 11
5. Les sept pas 12
6. Creuser jusqu'au feu : repères et conduit 14
7. État de l'art et technologies utiles 18
8. Le sursis : ce que le voile ferait, et ne ferait pas 21
9. Risques, limites et questions ouvertes 22
10. Rien sans l'accord de tous : gouvernance 25
11. Feuille de route 26
12. Budget préliminaire 27
13. Stratégie de financement 31
Glossaire 32
Références 33

Résumé exécutif

Le constat. En 2024, pour la première fois, une année civile entière a dépassé +1,5 °C au-dessus de l'ère préindustrielle : +1,60 °C selon Copernicus, environ +1,55 °C (± 0,13 °C) selon l'OMM [2, 3]. Une année isolée ne signifie pas que l'objectif de l'Accord de Paris, défini sur des moyennes de long terme, est déjà franchi ; mais la marge se réduit [4, 5]. L'Europe se réchauffe environ deux fois plus vite que la moyenne mondiale [6].

L'observation qui inspire le projet (VU). Le 15 juin 1991, le Pinatubo (Philippines) a envoyé environ **17 millions de tonnes** de dioxyde de soufre (SO_2) dans la stratosphère, jusqu'à 20 selon le satellite TOMS [7, 8]. Les aérosols sulfatés formés ont renvoyé une partie de la lumière du Soleil vers l'espace : la surface de la Terre a perdu en moyenne **environ un demi-degré pendant un an ou deux** [9, 10].

L'hypothèse du projet (SUPPOSÉ). Choisir une montagne qui « gonfle, qui tremble, qui transpire déjà un peu de soufre », loin des maisons et proche de l'équateur ; forer jusqu'à la chambre magmatique ; y faire entrer de l'eau à haute pression, au moment où les vents de la stratosphère sont favorables ; laisser le panache monter au-dessus des nuages ; observer, et savoir s'arrêter. Ce sont les **sept pas** de la méthode. Visée : **0,2 à 0,5 °C pendant 18 à 36 mois** par répit, et un **sursis de 2 à 5 ans** obtenu en additionnant plusieurs répits, sur des montagnes différentes, si les règles communes le permettent.

Ce qui est démontré, et ce qui ne l'est pas. Le refroidissement volcanique est démontré. Toucher du magma par forage aussi : Krafla (Islande, 2009, vers 2 100 m, autour de 900 °C) et Puna (Hawaï, 2005, vers 2 500 m), **sans éruption** [11, 12]. En revanche, **personne n'a jamais déclenché une éruption volontairement**, personne ne sait mesurer la pression d'une chambre avant d'agir, ni la quantité d'eau nécessaire, et la date d'une éruption naturelle reste très difficile à prévoir [13]. Le conduit capable de « tenir jusqu'à la chambre de feu » n'est pas encore dessiné.

Les risques. Une éruption reste un danger local majeur (cendres, coulées, lahars). Le voile peut affaiblir la couche d'ozone et perturber les moussons ; il ne corrige ni le CO_2 ni l'acidification des océans [14, 15, 16]. D'où la condition qui précède le premier pas : **« Rien sans l'accord de tous. »**

Ce que propose ce dossier. Une démarche par phases, avec des points d'arrêt : **Phase 0 — recherche et modélisation avec des partenaires scientifiques**, sans aucune action sur un volcan ; observation non invasive ensuite, seulement si un examen indépendant le justifie. Le chapitre 7 fait le point sur les technologies récentes qui peuvent aider (forage géothermique profond, capteurs à haute température, satellites, drones, modèles) et sur ce qu'elles ne résolvent pas. Un jalon extérieur est à suivre : le **Krafla Magma Testbed**, qui prévoit pour 2027 le premier forage conçu pour atteindre le magma [17]. **« Et si la science, un jour, dit non, il faudra l'accepter. »**

Budget. L'estimation préliminaire du projet s'élève à **390,815 M€** (phases : 84 / 10 / 6 %), dont un **budget de sécurité distinct de 18,2 M€** (surveillance, alerte, évacuation, assurance, arrêt d'urgence, drones de mesure du panache) et une première ligne pour la recherche de la Phase 0 (section 12). Ce n'est pas un devis : elle ne couvre pas la R&D de technologies qui n'existent pas encore.

Chiffres clés

- **≈ 17 Mt de SO_2** (jusqu'à 20 selon TOMS) : Pinatubo, 15 juin 1991 [7, 8]
- **≈ 0,5 °C** de baisse moyenne mondiale pendant un à deux ans ; jusqu'à 0,5-0,6 °C dans l'hémisphère Nord en 1992-1993 [7, 9, 10]
- **≈ 35 km** : hauteur du panache du Pinatubo ; **3 semaines** pour faire le tour de la Terre [9, 18]
- **8 à 18 km** : altitude de la tropopause, selon la latitude ; le panache doit la franchir
- **700 à 1 300 °C** : température d'un magma (enveloppe large) [19, 20]
- **1 L d'eau → ≈ 1 700 L de vapeur** à 100 °C et à pression normale [21]
- **2 100 m, ≈ 900 °C** : magma touché à Krafla en 2009, sans éruption [11] · **12 262 m** : Kola, le trou le plus profond [22]
- **≈ 1 350** volcans potentiellement actifs dans le monde [23]
- **Hypothèse** : 0,2-0,5 °C sur 18-36 mois par répit ; sursis de 2 à 5 ans · **2027** : forage KMT vers le magma [17]

Le projet en trois tiroirs

VU *Ce qu'on a vu*	◆ Les grandes éruptions tropicales refroidissent la Terre un temps : ≈ 0,5 °C pendant un à deux ans après le Pinatubo [9, 10]. ◆ L'eau peut rendre le feu explosif (éruptions phréatomagmatiques, Surtsey, Hunga Tonga) [24, 25]. ◆ On peut toucher une chambre magmatique par forage sans que la montagne rugisse (Krafla 2009, Puna 2005) [11, 12]. ◆ Le même voile réduit les pluies et abîme un temps l'ozone ; l'éruption reste un danger au sol [9, 15, 26].
SUPPOSÉ *Ce qu'on suppose*	◆ Qu'en faisant entrer de l'eau à haute pression dans la chambre d'une montagne déjà prête, au bon moment, on puisse lancer son soufre dans la stratosphère. ◆ Un répit de 0,2 à 0,5 °C sur 18 à 36 mois ; un sursis de 2 à 5 ans par répits successifs. ◆ Que ce « coup de pouce » à un volcan qui « allait parler de toute façon » serait plus sûr qu'un « ciel d'usine » (conviction).
IGNORÉ *Ce qu'on ignore*	◆ Le jour et l'heure d'une éruption ; la façon de lire « la fièvre » d'une montagne (pression de la chambre). ◆ La quantité d'eau nécessaire et son effet en profondeur ; si l'on saurait choisir l'heure et la taille de l'éruption. ◆ Le matériau et le dessin du conduit ; la liste des montagnes possibles ; lequel des deux chemins, volcan ou avions, serait le plus sûr.

1. Le siège de la chaleur : contexte climatique

« Ce n'était pas une guerre. C'était un siège. » L'image résume la situation ; les chiffres qui la justifient sont les suivants.

1.1 Ce qui est mesuré

- **L'objectif.** L'Accord de Paris (2015, article 2) vise à contenir le réchauffement « nettement en dessous de 2 °C » et à poursuivre l'action pour le limiter à 1,5 °C [4]. Le GIEC établit que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres de façon sans équivoque ; 2011-2020 dépassait d'environ 1,1 °C la période 1850-1900 [5].
- **2024.** Première année civile au-dessus de +1,5 °C : **+1,60 °C** selon Copernicus (ERA5) [2] ; **≈ +1,55 °C ± 0,13 °C** selon la synthèse de six jeux de données de l'OMM [3, 27]. Le phénomène El Niño de 2023-2024 y a contribué, en plus de la tendance de fond.
- **Des mois au-dessus de +1,7 °C.** Février 2024 : +1,77 °C ; janvier 2025 : +1,75 °C par rapport à 1850-1900 [28, 29].
- **L'Europe** se réchauffe environ deux fois plus vite que la moyenne mondiale [6, 27].
- **Les boucles.** La glace du Groenland et les glaciers fondent, le pergélisol dégèle et libère son carbone, des forêts brûlent et relâchent le leur [5].

> **À ne pas confondre**
>
> Une année au-dessus de 1,5 °C n'est pas un « dépassement de l'Accord de Paris » : le seuil se juge sur une moyenne de plusieurs décennies. On dit donc « pour la première fois sur une année entière » [3, 4].

1.2 Ce que suppose le projet

VU *Ce qu'on a vu*	◆ 2024 : première année civile au-dessus de +1,5 °C ; des mois au-dessus de +1,7 °C [2, 28, 29].
SUPPOSÉ *Ce qu'on suppose*	◆ **Prévision du projet** : une accélération plus soudaine que celle qu'on attend. « Ce n'est pas une certitude, mais elle a un mérite rare : on pourra la vérifier bientôt. » ◆ Une fois le seuil franchi, chaque boucle chauffe, et la chaleur relance chaque boucle : le réchauffement pourrait commencer à s'entretenir lui-même.
IGNORÉ *Ce qu'on ignore*	◆ Le temps exact dont disposera le monde. C'est ce temps que le projet cherche à gagner.

1.3 Les deux chevaux : pourquoi gagner du temps

La logique du projet tient dans une image : deux chevaux sur la même route. **Le cheval de feu**, c'est la chaleur : il court de plus en plus vite et ne s'arrête jamais. **Le cheval de lumière**, ce sont les solutions durables (baisse des émissions, énergies propres, retrait du carbone de l'air). Le Projet JILL ne prétend

pas remplacer le cheval de lumière ; il cherche seulement à **retenir un temps le cheval de feu**, pour que l'autre le rattrape.

> **Principe du projet**
>
> *« Le voile ne soignerait rien. Il ne retirerait pas un gramme de carbone de l'air. »*

Le projet appartient à la famille des techniques de **modification du rayonnement solaire** (SRM), plus précisément à l'**injection d'aérosols stratosphériques** (SAI), étudiée par des équipes universitaires, des académies des sciences et les Nations unies [14, 30, 31]. Sa particularité : il ne transporte pas le soufre par avion ; il propose d'accompagner un volcan qui s'apprête déjà à entrer en éruption. Cette idée n'a pas encore été évaluée dans la littérature scientifique.

2. Ce que les volcans nous ont appris

2.1 Le Pinatubo, 15 juin 1991

« La surface de la Terre a perdu, en moyenne, environ un demi-degré, pendant un an ou deux. » Ce fait mesuré est le point de départ du projet. Le même épisode a aussi réduit les pluies et aminci un temps la couche d'ozone [15, 26] ; au pied de la montagne, le jour de l'éruption, le typhon Yunya mêlait cendres et pluie : coulées de boue, « une tragédie au sol » [9].

2.2 Éruptions de référence

Éruption	Soufre vers la stratosphère	Effet climatique	Coût humain et local, leçon	Sources
Pinatubo (Philippines), 15 juin 1991	≈ 17 Mt de SO_2 ; jusqu'à 20 selon TOMS ; 15 selon NASA ; estimations publiées : 15 à 20 Mt	≈ –0,5 °C en moyenne mondiale pendant 1 à 2 ans ; jusqu'à 0,5-0,6 °C dans l'hémisphère Nord en 1992-1993 ; baisse record des pluies sur les terres en 1992 ; pertes d'ozone accrues	Évacuation : au moins 5 000 vies sauvées ; lahars destructeurs pendant des années. Panache ≈ 35 km ; tour de la Terre en 3 semaines	[7, 8, 9, 10, 15, 18, 26, 32]
El Chichón (Mexique), 1982	≈ 7 à 8 Mt de SO_2 (le Pinatubo en a injecté « un peu plus du double »)	Refroidissement de surface pas clairement documenté ; éruption contemporaine d'un fort El Niño	Le volume de magma émis est presque sans rapport avec le soufre libéré : tout dépend du magma	[7, 33]
Tambora (Indonésie), avril 1815	≈ 60 Mt de soufre, environ six fois le Pinatubo	–0,4 à –0,8 °C en moyenne annuelle (tropiques et hémisphère Nord) ; ≈ –1 °C sur les terres dans les modèles ; 1816, « l'année sans été »	Plus de 71 000 morts, en grande partie par la famine. Rappel du danger d'un voile trop fort	[34, 35]
Surtsey (Islande), 1963	Éruption sous-marine peu profonde	Sans objet : cité pour l'interaction eau-magma	L'eau de mer « déchire le magma » ; une île naît, puis la vie la gagne : un laboratoire naturel	[24]
Hunga Tonga (Tonga), janvier 2022	Peu de soufre : la mer en a retenu l'essentiel	Panache record ≈ 57 km ; ≈ 10 % de vapeur d'eau en plus dans la stratosphère, effet plutôt réchauffant	Tsunami régional ; preuve que la rencontre eau-magma peut être explosive	[25, 36, 37]

Deux leçons. **L'effet est réel mais court** : sans nouvel apport, la stratosphère se « nettoie » en un à trois ans [33]. **Le refroidissement a un prix** : le voile qui rafraîchit modifie les pluies et abîme l'ozone, et l'éruption reste un drame possible au pied du volcan. Le projet doit partir de ces deux faits, et non d'un seul.

2.3 La chaîne physique, de la montagne au voile

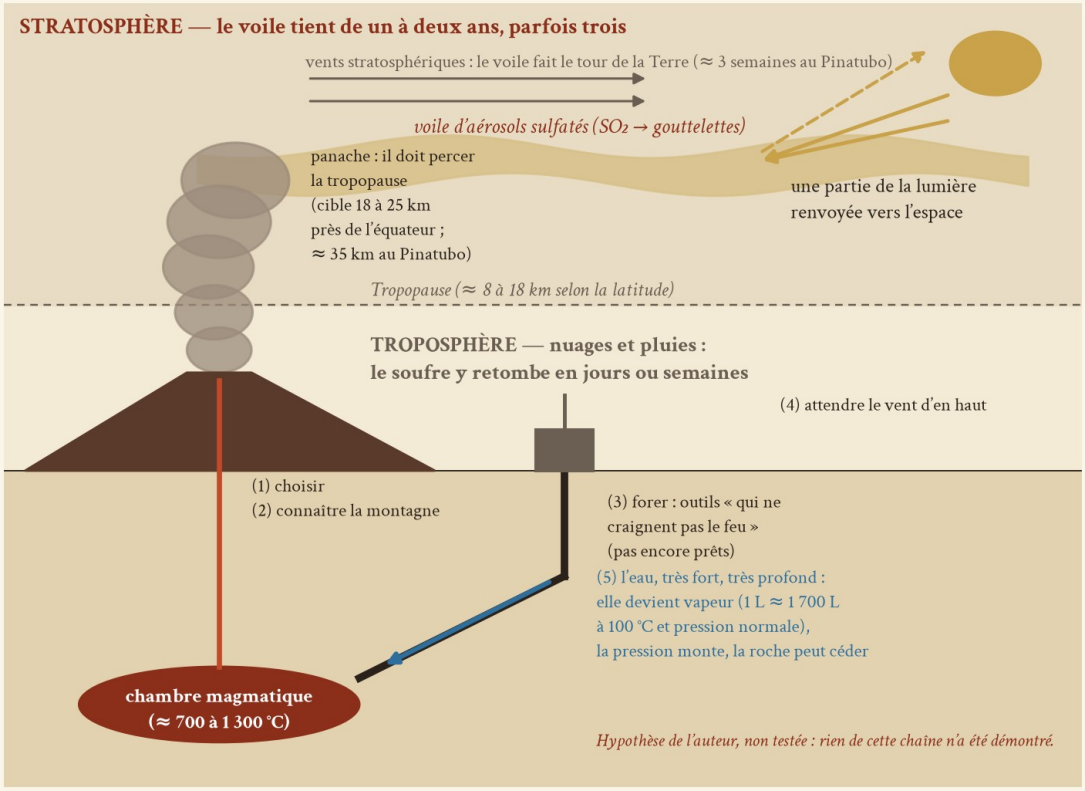


Figure 1. *Principe de l'hypothèse : de la chambre magmatique au voile stratosphérique. Schéma de principe, sans échelle. Les étapes (1) à (5) renvoient aux sept pas (section 5).*

1. **Le soufre du magma.** Le magma contient des gaz dissous : surtout de la vapeur d'eau, puis du CO_2 et du SO_2. Quand leur pression l'emporte sur la résistance de la roche, le magma monte : c'est l'éruption [19, 33].
2. **Franchir la tropopause.** Le « plafond » qui sépare la troposphère (nuages, pluies) de la stratosphère se situe vers 8 à 18 km selon la latitude, plus haut près de l'équateur. Plus bas, la pluie lave le soufre en quelques jours ou semaines ; il faut donc un panache assez puissant. Sa hauteur dépend surtout du débit de l'éruption [38].
3. **Du gaz aux gouttelettes.** Dans la stratosphère, le SO_2 se transforme en aérosols sulfatés. Au Pinatubo, environ la moitié du SO_2 avait été convertie en trois à quatre semaines [7].
4. **Le voile.** Ces gouttelettes renvoient vers l'espace une partie du rayonnement solaire ; moins de lumière atteint le sol [10, 26].
5. **Le tour du monde, puis la fin.** Près de l'équateur, les vents d'en haut répartissent le voile sur les deux hémisphères. Il tient un an ou deux, parfois trois, puis s'efface [18, 33].

Ce que la physique interdit de promettre

- **Aucun effet sur le CO_2.** L'acidification des océans continue [30, 31].
- **Un effet borné par le soufre disponible**, pas par le déclencheur : « sans soufre, pas de voile » [7].
- **L'eau peut jouer contre l'objectif** : de la vapeur d'eau envoyée dans la stratosphère tend à réchauffer (Hunga Tonga [37]).

3. L'eau et le feu

Le cinquième pas repose sur une idée centrale du projet : l'eau ne vient pas « éteindre le feu », mais lui « parler sa langue ». Voici ce qu'on en sait vraiment.

3.1 Ce qu'on a vu

- **L'eau devient vapeur.** À 100 °C et à pression normale, 1 litre d'eau liquide donne environ 1 700 litres de vapeur [21]. « L'eau devient vapeur, la vapeur pousse, la roche peut céder. »
- **Des volcans entiers ont explosé de cette rencontre** : on parle d'éruptions **phréatomagmatiques**. Quand la glace d'un glacier fond et que l'eau trouve le chemin du feu, la montagne devient explosive ; sous une mer peu profonde, l'eau « déchire le magma » : ainsi est née Surtsey, en 1963 [24].
- **Hunga Tonga, 2022** : la rencontre de l'eau de mer et du magma a été explosive ; la mer a retenu l'essentiel du soufre [25].
- **Krafla, 2009** : au contact du fluide de forage, le magma s'est **figé en verre**. L'eau peut donc aussi arrêter le feu, au moins localement [11, 39].

3.2 Ce qu'on ignore

Là où on l'a observée, la rencontre eau-magma se fait près du cratère ou près de la surface. **Plus profond, on ne sait pas.** Personne ne sait aujourd'hui :

- **quelle quantité d'eau** il faudrait : « trop peu d'eau, et rien ne bouge ; trop, et l'on risque d'éteindre ce qu'on voulait attiser » ;
- **comment mesurer la pression d'une chambre** avant d'agir. Or « c'est sans doute la pression, tout au fond, qui décide si la montagne se tait ou si elle gronde » ;
- **l'effet exact de l'eau** selon sa quantité, et si une main humaine saurait choisir l'heure de l'explosion, et sa taille.

Précision physique ajoutée par le dossier

En profondeur, l'eau ne reste ni « liquide » ni « vapeur » au sens courant : au-delà de 374 °C et d'environ 22 MPa (point critique), elle devient un **fluide supercritique** [21]. Le puits IDDP-2 (Reykjanes, 2017, ≈ 4,5 km, ≈ 426 °C) a atteint de telles conditions [40]. Tout modèle du cinquième pas doit en tenir compte.

L'injection d'eau sous pression peut déclencher des phénomènes qu'on ne maîtrise pas : séisme de magnitude 5,5 à Pohang (Corée du Sud, 2017), lié à la stimulation d'un réservoir géothermique [41] ; volcan de boue de Lusi (Java, 2006), attribué par plusieurs études à un forage, débat non clos [42].

4. Le vent des hauteurs

« Le ciel est un immeuble à étages. » En bas, la **troposphère** : nos nuages, nos pluies. Au-dessus, un plafond, la **tropopause**. Plus haut, la **stratosphère**, « un autre ciel, presque vide, avec ses propres vents ».

VU *Ce qu'on a vu*	◆ Le jour de l'éruption du Pinatubo, le typhon Yunya passait dans la troposphère : cendres mouillées, coulées de boue. Le panache a percé la tropopause et est monté à environ 35 km [9]. ◆ Le nuage a fait le tour de la Terre en trois semaines, et la fraîcheur a suivi [18]. ◆ En bas, la pluie lave le soufre trop tôt ; au-dessus des nuages, le voile tient assez pour compter [33].
SUPPOSÉ *Ce qu'on suppose*	◆ **Hypothèse du projet** : choisir le moment. « Livrée à elle-même, la montagne pourrait parler un jour sans vent. Choisir le moment, c'est peut-être toute la différence. »
IGNORÉ *Ce qu'on ignore*	◆ Si l'on saurait faire coïncider une éruption avec le bon vent : la date d'une éruption reste très difficile à prévoir, même pour des volcans bien surveillés [13].

> **Principe du projet**
>
> *« Le vent fait ce qu'il veut. C'est toi qui fais le reste. »*

Ce que la recherche peut faire dès aujourd'hui. Les modèles climatiques savent simuler une même éruption à différentes saisons et latitudes, et la dispersion de son nuage selon les vents stratosphériques (cadre VolMIP) [43]. C'est l'un des premiers travaux proposés pour la Phase 0 : mesurer, par le calcul, « toute la différence » que ferait le choix du moment.

5. Les sept pas

La méthode du projet tient en sept pas, « au bon endroit, au bon moment ». Au-dessus du premier se trouve une ligne qui n'est pas un pas de plus, mais une condition : **« Rien sans l'accord de tous. »**



Figure 2. *Les sept pas de la méthode, précédés de leur condition commune.*

Pas	Le principe	Ce qu'il faut savoir ou démontrer
1. Choisir	« Il faut une montagne qui gonfle, qui tremble, qui transpire déjà un peu de soufre ; loin des maisons, assez près du ciel, et pas trop loin de la ceinture du monde, pour que les vents d'en haut portent le voile sur les deux moitiés de la Terre. On n'allume pas un feu : on accompagne celui qui a déjà pris la route. »	Signes de pré-éruption (déformation, séismes, dégazage) ; latitude tropicale ; éloignement des populations. **IGNORÉ** : la liste des montagnes possibles ; les signes ne donnent ni la date ni la taille d'une éruption [13].
2. Connaître la montagne	« Combien de feu dort là-dessous ? Combien d'eau, combien de soufre ? Car sans soufre, pas de voile. Trop pleine, la montagne parlera seule ; assez calme, on pourra entrer sans la brusquer. […] Mais personne ne sait encore lire sa fièvre comme on prend celle d'un enfant, et c'est le grand manque. »	Imagerie du réservoir, teneur en soufre, scénarios de danger. **IGNORÉ** : mesurer la pression d'une chambre ; c'est l'objet même du Krafla Magma Testbed [17].
3. Creuser	« L'eau doit rejoindre le feu là où il dort, loin sous la surface. […] Pour aller plus bas, il faudra des outils qui ne craignent pas le feu. Ils ne sont pas encore prêts ; on les prépare. »	Magma touché à 2 100 m (Krafla) et vers 2 500 m (Puna), sans éruption [11, 12]. Conduit non dessiné (section 6).
4. Attendre	« Le vent d'en haut ne passe pas tous les jours. Sans lui, le voile reste au-dessus de sa montagne ; avec lui, il devient un répit pour tous. […] Choisir le moment, c'est peut-être toute la différence. »	Modélisation saisonnière de la dispersion (section 4) [43].
5. L'eau	« Très fort, très profond, non pour éteindre le feu, mais pour lui rappeler ce qu'il connaît déjà. L'eau devient vapeur, la vapeur pousse, la roche peut céder. Si le magma est prêt, il suit le chemin. On ne lui apporte rien d'étranger : on lui parle sa langue. »	**IGNORÉ** : quantité d'eau, effet en profondeur, contrôle de l'heure et de la taille (section 3). Aucun déclenchement volontaire n'a jamais été réalisé.
6. La montée	« Le feu doit franchir les nuages et monter là où la pluie ne va plus. Plus bas, elle laverait le soufre. Plus haut, il voile un peu le soleil, un an, deux, parfois trois. Un répit, et non un hiver éternel. »	Hauteur du panache liée au débit de l'éruption [38] ; tropopause vers 8 à 18 km.
7. Observer, et savoir s'arrêter	« Une fois ne suffit pas, et une fois peut être de trop. On mesure, on apprend, on s'arrête bien avant le froid, et l'on ne recommence que si les mesures le permettent. »	Mesures par satellites, lidars et ballons, comme après chaque grande éruption [18, 32]. Critères d'arrêt à publier à l'avance.

« Sept pas, simples à dire, bien moins simples à faire. Le plus long reste à venir : les vérifier. »

5.1 Critères pour choisir une montagne (premier et deuxième pas)

Aucun volcan n'est désigné : la liste des montagnes possibles fait partie de ce qu'on ignore, et une liste nominative exigerait des données de surveillance, une étude scientifique et l'accord des pays concernés. Les critères ci-dessous traduisent en termes techniques les principes du premier et du deuxième pas.

Principe	Critère technique	Pourquoi
« qui gonfle, qui tremble, qui transpire déjà un peu de soufre »	Déformation du sol, sismicité, émissions de SO_2 mesurées par satellite	N'agir que sur un système déjà en tension (« on accompagne celui qui a déjà pris la route »). Ces signes ne garantissent ni la date ni la taille [13]
« loin des maisons »	Population dans un rayon de 30-50 km, vallées exposées aux lahars, capacité d'évacuation	Le coût humain local est le premier risque du projet [9]
« assez près du ciel »	Volcan explosif (andésite, dacite) capable d'un panache au-dessus de la tropopause	Seules les éruptions explosives portent le SO_2 dans la stratosphère [33, 38]
« pas trop loin de la ceinture du monde »	Zone tropicale (environ ± 20°)	Le voile se répartit alors sur les deux hémisphères (Pinatubo, 15° N) [33]
« Combien de soufre ? »	Pétrologie, inclusions vitreuses, flux de gaz	« Sans soufre, pas de voile » ; le soufre ne suit pas le volume émis [7]
« Combien de feu… combien d'eau ? »	Profondeur, volume et pression du réservoir (sismique, gravimétrie, magnétotellurique)	Conditionne le troisième et le cinquième pas
« Rien sans l'accord de tous »	Accord de l'État hôte, consentement des populations, cadre international	Aucune action n'est légitime sans ce cadre [44, 45, 46]

6. Creuser jusqu'au feu : repères et conduit

Le conduit doit être « assez fort pour tenir jusqu'à la chambre de feu ». **Ce conduit n'est pas encore dessiné** : aucun matériau, aucune architecture de puits n'a été conçue pour rester au contact d'un magma. Cette section rassemble les repères réels dont on dispose ; le chapitre suivant passe en revue les technologies récentes qui pourraient aider.

6.1 Points de repère réels

Repère	Ce qui a été fait	Sources
Kola SG-3 (Russie), 1989	12 262 m : le trou le plus profond jamais creusé (en profondeur verticale), loin de tout volcan ; environ 180 °C au fond. « La profondeur n'était donc pas un mur, seulement une distance. »	[22, 47]
Krafla IDDP-1 (Islande), 2009	Magma rhyolitique atteint par accident vers 2 100 m, autour de 900 °C, **sans éruption** ; le magma s'est figé en verre au contact du fluide de forage	[11, 39]
Puna (Hawaï), 2005	Magma dacitique (≈ 1 050 °C) rencontré vers 2 500 m (2 488 m) lors d'un forage géothermique, **sans éruption**	[12]
IDDP-2 (Reykjanes, Islande), 2017	≈ 4,5 km, ≈ 426 °C : conditions supercritiques atteintes	[40]
Quaise Energy (Texas), 2025	Forage par ondes millimétriques (technique issue du MIT) : 100 m de granite, sans trépan. Une piste, pas un outil disponible	[48]
Krafla Magma Testbed	Prévoit pour 2027 le premier forage conçu pour atteindre le magma et y poser des capteurs	[17]

Krafla et Puna : ce que ces repères montrent

« C'est rare, mais pas unique. [...] Ce n'est pas la preuve qu'on saurait choisir l'heure. C'est un signe encourageant : on peut toucher une chambre sans que la montagne rugisse. »

6.2 Le conduit et les outils

Élément	Principe du projet	État de l'art	Statut
Conduit jusqu'à la chambre	« tungstène et céramique avancée, ou d'une autre matière encore » ; pas encore dessiné	Aucun tubage n'a été conçu pour rester au contact d'un magma. Les superalliages courants (Inconel 718) sont donnés jusqu'à ≈ 700 °C [49] ; le tungstène fond vers 3 414 °C [50], mais aucune étude ne l'a évalué en conduit au contact d'un magma	**IGNORÉ** : à concevoir
Outils de forage « qui ne craignent pas le feu »	« Ils ne sont pas encore prêts ; on les prépare »	Les taillants diamant (PDC) se dégradent vers 750 °C au point de coupe [51] ; plasma et ondes millimétriques en développement [48]	Recherche
Profondeur à atteindre	La chambre, « à quelques kilomètres de profondeur » ; pas de chiffre fixé	Magma rencontré vers 2,1 et 2,5 km (Krafla, Puna) ; réservoirs des grands volcans explosifs plutôt vers 6-11 km (voir 6.3) ; 12 km forés hors volcan (Kola)	Dépend de chaque montagne
Injection d'eau « à haute pression »	« Très fort, très profond »	Pompes et obturateurs de puits éprouvés en géothermie, pas au contact du magma	Partiellement démontré
Mesure de la pression de la chambre	« personne ne sait encore lire sa fièvre »	Objet du Krafla Magma Testbed [17]	**IGNORÉ**
Surveillance et intelligence artificielle	« L'intelligence des hommes et de leurs machines est notre vraie chance » (conviction du projet)	Utile pour fusionner les données ; ne supprime pas l'incertitude sur le comportement d'un volcan [13] (voir 7.6)	Éprouvé pour la surveillance

Note sur le tungstène. Ce matériau est cité à titre d'exemple, avec « une autre matière encore ». Son point de fusion très élevé est un atout ; mais sa tenue mécanique et chimique dans un puits volcanique (gaz corrosifs, chocs thermiques, pression) n'a jamais été évaluée. Le choix du matériau est un sujet de recherche de la Phase 0, à confier à des spécialistes des matériaux.

6.3 Pourquoi viser 10 à 12 km, alors qu'à Krafla le magma était à 2,1 km ?

Le projet retient une profondeur de travail de 10 à 12 km pour atteindre la chambre, « à quelques kilomètres » sous la montagne. Cette section examine ce que les données disent de ce chiffre, très supérieur aux 2,1 km de Krafla. **Conclusion en une phrase : les données justifient de viser bien plus profond que Krafla, typiquement 6 à 11 km pour un grand volcan explosif ; 10-12 km est l'enveloppe haute qui couvre les réservoirs les plus profonds, à adapter montagne par montagne.**

Argument 1 — Krafla n'est pas le bon modèle

Krafla est un volcan de rift, en Islande, à magma surtout basaltique. Le magma touché en 2009 vers 2 100 m était une petite poche de rhyolite, formée par fusion partielle de roches basaltiques altérées, près de la surface [11, 39]. Ce n'est pas le réservoir d'un volcan capable d'éruptions pliniennes riches en soufre, et ce contact n'a déclenché aucune éruption. Puna (Hawaï, 2005, dacite vers 2 500 m) est lui aussi un cas de volcan de point chaud [12].

Argument 2 — Les réservoirs des grandes éruptions explosives sont plus profonds

Volcan ou compilation	Profondeur du réservoir	Méthode	Source
Pinatubo, 1991	Dacite stockée vers 200 MPa, soit ≈ 8 km sous l'ancien sommet (≈ 6 km sous le niveau de la mer) ; zone à faible vitesse sismique, interprétée comme du magma, entre 6 et 11 km ; magma riche en liquide seulement au-delà de 8 km sous le sommet	Pétrologie, sismique, tomographie	[52, 53]
Mont Saint Helens, 18 mai 1980	Pression des fluides ≈ 220 MPa dans la chambre (≈ 7 à 8 km)	Pétrologie expérimentale	[54]
Volcans d'arc (compilation mondiale)	Profondeurs observées de 0 à 20 km ; moyenne géophysique 6 ± 3 km ; les magmas les plus riches en eau, donc les plus explosifs, se bloquent plus profond	Géophysique et pétrologie	[55]
Tous contextes (modélisation)	Réservoirs éruptibles concentrés autour de 2 ± 0,5 kbar (≈ 6 à 9 km)	Modèle thermomécanique et données publiées	[56]

Le soufre suit la même logique. Les grandes éruptions riches en soufre, comme le Pinatubo, libèrent plus de SO_2 que ce que contenait le magma fondu : l'excédent vient d'une phase gazeuse accumulée dans le réservoir avant l'éruption [57]. Au Pinatubo, cette accumulation a été liée à l'arrivée de basalte dans le réservoir de dacite, vers 8 km [52, 53]. **Si l'objectif est le soufre (« sans soufre, pas de voile »), la cible est le réservoir profond, pas une poche superficielle.**

Argument 3 — Pression et puissance de l'éruption

- **Pression lithostatique.** Le poids des roches croît d'environ 26 à 27 MPa par kilomètre (densité ≈ 2,7). À 8 km, la pression atteint environ 200 MPa ; à 10-12 km, environ 265 à 320 MPa. C'est cohérent avec les pressions de stockage mesurées au Pinatubo et au Saint Helens [52, 54].
- **Monter au-dessus de la tropopause.** La hauteur d'un panache dépend surtout du débit de l'éruption [38, 58]. Selon la relation empirique de Mastin et al. ($H \approx 2 \times V^{0,241}$, H en km, V en m^3/s de magma dense), un panache de 20 km demande de l'ordre de 14 000 m^3/s, soit plusieurs dizaines de millions de kilogrammes par seconde [38]. Un tel débit suppose un grand réservoir riche en gaz, du type de ceux décrits ci-dessus, et non une petite poche.

Ce qui reste discuté ou inconnu

VU *Ce qu'on a vu*	◆ Magma touché vers 2,1 et 2,5 km sans éruption [11, 12]. ◆ Réservoirs des grands volcans explosifs : surtout entre 6 et 11 km ; extrêmes de 0 à 20 km [52, 55, 56].
SUPPOSÉ *Ce qu'on suppose*	◆ Qu'il faille atteindre le réservoir principal, et non sa partie haute, pour mobiliser le soufre. ◆ Que 10-12 km soit la bonne marge : la plupart des données pointent plutôt vers 6-10 km ; 10-12 km ne vaut que pour les réservoirs les plus profonds.
IGNORÉ *Ce qu'on ignore*	◆ La profondeur exacte du réservoir de chaque montagne candidate : elle se mesure volcan par volcan (deuxième pas). ◆ Si des réservoirs moins profonds, plus faciles à atteindre, pourraient suffire. ◆ La faisabilité : aucun forage n'a dépassé 12 262 m (Kola, ≈ 180 °C au fond, hors volcan) ; près d'un réservoir, la roche est bien plus chaude, et les taillants actuels se dégradent vers 750 °C [22, 47, 51]. Forer à 10-12 km en contexte volcanique reste au-delà de l'état de l'art.

Ce que le dossier retient. La profondeur n'est pas un chiffre unique : elle découle de la montagne choisie. La Phase 0 doit établir, pour chaque cas, la profondeur du réservoir (sismique, déformation, pétrologie) et dire si un forage jusque-là est envisageable. Le chiffre de 10-12 km est présenté comme une limite haute.

7. État de l'art et technologies utiles

Le Projet JILL ne pourra avancer qu'en s'appuyant sur des techniques qui progressent ailleurs : la géothermie profonde, les matériaux pour hautes températures, l'imagerie des volcans, la mesure des gaz, l'observation de la stratosphère et la prévision des éruptions. Ce chapitre fait le point, fin 2026, sur ce qui existe réellement. Pour chaque technique : ce que c'est, où elle a été démontrée, ce qu'elle apporterait au projet, et ses limites.

Comment lire la maturité

- **Démontré** : fonctionne sur le terrain, résultats publiés ou installation en service.
- **Essais de terrain** : prototypes testés en conditions réelles, sans usage courant.
- **En préparation** : projet financé et planifié, pas encore réalisé.

Les chiffres annoncés par des entreprises sont signalés comme tels lorsqu'aucune vérification indépendante n'a été publiée.

7.1 Forage profond et géothermie « superchaude »

Technique et maturité	Ce que c'est, où on en est	Ce qu'elle apporterait à JILL	Limites
IDDP-2 (Reykjanes, Islande) · *démontré, un puits*	Puits de recherche foré en 2017 jusqu'à ≈ 4,5 km ; ≈ 426 °C au fond : des conditions supercritiques ont été atteintes [40].	Montre qu'on sait forer et tuber un puits dans des fluides supercritiques, très corrosifs.	426 °C, loin des 900 à 1 000 °C d'un magma ; 4,5 km, moins que les 6 à 11 km d'un grand réservoir (section 6.3).
Krafla Magma Testbed (Islande) · *en préparation*	Premier puits conçu pour atteindre un magma connu, à 2 100 m, pour l'échantillonner et y poser des capteurs durables (KMT-I), puis un second pour des expériences (KMT-II). Forage annoncé pour 2027 [17, 59]. Défis cités par l'équipe : intégrité du puits, contraintes thermiques, corrosion, cimentation, mesures [60].	L'expérience la plus proche des deuxième et troisième pas : premières mesures directes dans un magma, matériaux de puits testés à son contact.	Volcan de rift basaltique, à 2,1 km : ce n'est pas un réservoir de volcan explosif. Le calendrier a déjà glissé de 2026 à 2027.
Quaise Energy (États-Unis) · *essais de terrain*	Forage sans trépan : un faisceau d'ondes millimétriques (gyrotron, technique issue du MIT) vaporise la roche. 118 m de granite en 2025 ; en juillet 2026, l'entreprise se dit « proche d'un kilomètre » et vise plus de 5 km [48, 61].	Une piste pour forer des roches très chaudes, là où les taillants diamant se dégradent (vers 750 °C au point de coupe [51]).	Chiffres annoncés par l'entreprise, sans vérification indépendante publiée. Aucun forage profond réalisé ; jamais testé dans un volcan.
Fervo Energy (États-Unis) · *démontré, exploitation commerciale*	Géothermie stimulée (EGS) avec puits horizontaux, technique venue du pétrole : premier doublet horizontal testé 37 jours en 2023 (Nevada), jusqu'à ≈ 191 °C [62]. Fibre optique dans le puits pour suivre en temps réel la micro-sismicité ; le contrôle des cycles de pression a limité l'activité sismique [63].	Forage dirigé, mesure par fibre optique et pilotage de la pression : des outils directement utiles pour injecter de l'eau en profondeur en surveillant la réaction de la roche.	≈ 191 °C, roche chaude mais sans magma. Toute injection d'eau peut provoquer des séismes (Pohang, 2017 [41]).
Eavor (Geretsried, Allemagne) · *démontré, mise en service fin 2025*	Géothermie en boucle fermée : deux puits à 4 235 m reliés par douze forages latéraux de 3,5 km ; réservoir à 150-170 °C ; électricité livrée au réseau depuis décembre 2025 [64, 65]. Tige de forage isolée pour refroidir les outils, guidage magnétique pour faire se rejoindre deux puits [64].	Refroidir les outils pendant le forage et viser une cible souterraine avec précision : deux besoins du troisième pas.	150-170 °C seulement. Le forage a duré plus de deux ans (juillet 2023 - octobre 2025), avec de nombreuses difficultés techniques [65].

7.2 Matériaux et capteurs pour hautes températures

Technique et maturité	Ce que c'est, où on en est	Ce qu'elle apporterait à JILL	Limites
Électronique en carbure de silicium (NASA Glenn) · *démontré en laboratoire*	Des circuits intégrés en SiC ont fonctionné plus d'un an à 500 °C, à l'air libre ; les auteurs citent le suivi des forages profonds parmi les applications [66].	Des capteurs électroniques qui survivraient au fond d'un puits chaud, au lieu d'être refroidis ou remontés.	500 °C, pas 900 °C ; circuits encore simples (quelques centaines de transistors).
Superalliages, céramiques, tungstène · *recherche*	Les superalliages courants (Inconel 718) sont donnés jusqu'à ≈ 700 °C [49] ; le tungstène fond vers 3 414 °C [50]. Le KMT teste des métaux, tubages et techniques de refroidissement spéciaux [60].	Le matériau du conduit « jusqu'à la chambre de feu » est le verrou principal du projet.	Aucun tubage n'a été qualifié au contact d'un magma : gaz corrosifs, chocs thermiques et pression n'ont jamais été testés ensemble.
Fibre optique (température et acoustique distribuées) · *démontré en géothermie*	Une fibre le long du puits mesure en continu la température ou les vibrations sur toute sa longueur [63].	Suivre la chaleur et les micro-séismes pendant le forage et l'injection ; donner l'alerte tôt.	Les fibres et leurs gaines ont elles aussi une limite de température ; non qualifiées au contact d'un magma.

7.3 Voir sous la montagne : imagerie du magma

Technique et maturité	Ce que c'est, où on en est	Ce qu'elle apporterait à JILL	Limites
Tomographie sismique, gravimétrie, magnétotellurique · *démontré*	Elles cartographient les zones chaudes ou fondues sous un volcan. Au Pinatubo, une zone à faible vitesse sismique a été repérée entre 6 et 11 km [53] ; ces méthodes alimentent les compilations mondiales de profondeur des réservoirs [55].	Le deuxième pas : savoir où se trouve le réservoir, à quelle profondeur et quel volume, avant tout forage.	Résolution de l'ordre du kilomètre ; l'interprétation (magma, fluide, roche chaude) reste discutée.
InSAR (radar satellitaire) · *démontré, couverture mondiale*	Mesure depuis l'espace des déformations du sol de l'ordre du centimètre. Sur 198 volcans suivis pendant 18 ans, 46 % des volcans qui se déformaient sont entrés en éruption ; 94 % de ceux qui ne se déformaient pas sont restés calmes [67].	Repérer les montagnes « qui gonflent » (premier pas), même sans réseau au sol.	Une déformation n'annonce ni la date ni la taille d'une éruption ; plus de la moitié des volcans qui gonflent n'entrent pas en éruption.
Muographie (muons cosmiques) · *démontré sur quelques volcans*	Les muons venus de l'espace traversent la roche ; leur absorption révèle la densité, comme une radiographie. Au Satsuma-Iwojima (Japon), elle a montré le magma qui montait et redescendait dans le conduit [68].	Suivre le sommet d'un conduit en temps quasi réel pendant le cinquième et le sixième pas.	Ne voit que la partie haute du volcan, au-dessus du détecteur : pas un réservoir à plusieurs kilomètres de profondeur.

7.4 Mesurer les gaz : satellites, drones, capteurs

Technique et maturité	Ce que c'est, où on en est	Ce qu'elle apporterait à JILL	Limites
TROPOMI (satellite Sentinel-5P, Copernicus) · *démontré, opérationnel*	Mesure chaque jour le SO_2 sur presque toute la Terre, sur une fauchée d'environ 2 600 km [69, 70] ; données en accès libre.	Suivre le soufre des montagnes candidates, puis le voile après une éruption (septième pas).	Mesure la quantité totale de gaz dans la colonne d'air ; l'altitude du nuage est plus incertaine ; les nuages gênent.
Drones à capteurs MultiGAS · *démontré*	Au Manam (Papouasie-Nouvelle-Guinée), en 2019, des drones à voilure fixe ont volé hors de vue jusqu'au panache avec un analyseur de gaz de 550 g. Avec les mesures au sol et satellitaires : ≈ 5 150 t de SO_2 et ≈ 3 760 t de CO_2 par jour, des chiffres jusque-là inconnus [71, 72]. Des systèmes légers complets coûtent environ 3 500 € [73].	Inspecter le cratère et mesurer le panache sans exposer d'équipes ; c'est le rôle des drones de surveillance du budget de sécurité (section 12.4).	Sur trois vols analysés au Manam, l'un a échoué dans la turbulence du panache [72] ; vols hors de vue soumis à autorisation ; portée et plafond limités.

7.5 Observer et modéliser la stratosphère

Technique et maturité	Ce que c'est, où on en est	Ce qu'elle apporterait à JILL	Limites
Modèles climatiques coordonnés (VolMIP, GeoMIP) · *démontré*	Des dizaines de modèles simulent la même éruption ou la même injection de soufre pour comparer leurs réponses [43, 74].	Le cœur de la Phase 0 : simuler une éruption « à date choisie » selon la saison et la latitude.	Les modèles divergent sur les pluies régionales et l'ozone [14].
Lidars, ballons-sondes, satellites : la leçon du Hunga Tonga · *démontré*	Après l'éruption du 15 janvier 2022, satellites, lidars au sol, mesures in situ et radiosondes ont suivi le panache jusqu'à plus de 50 km. Ce fut la plus forte perturbation d'aérosols depuis le Pinatubo et la plus forte de vapeur d'eau jamais observée par satellite. Après deux semaines, la vapeur d'eau a dominé : l'effet net est devenu un réchauffement [37, 75].	Montre qu'on sait mesurer vite un panache stratosphérique ; et rappelle que l'eau du cinquième pas pourrait réduire, voire annuler, le refroidissement si elle montait avec le soufre.	Éruption sous-marine, très riche en eau : un cas extrême, pas un modèle direct pour JILL.

7.6 Prévoir les éruptions : surveillance et intelligence artificielle

Technique et maturité	Ce que c'est, où on en est	Ce qu'elle apporterait à JILL	Limites
Apprentissage automatique sur les données sismiques · *démontré a posteriori, un volcan*	À Whakaari (Nouvelle-Zélande), un modèle a repéré des précurseurs dans le signal sismique ; en test, il aurait alerté pour quatre éruptions sur cinq, dont celle de 2019, au moins quatre heures avant [76].	Aider au premier pas (repérer une montagne en tension) et au septième (alerte et arrêt).	Testé sur un seul volcan et sur peu d'éruptions, petites et phréatiques ; ne dit rien de la taille ; la prévision reste probabiliste [13].

Ce que ces technologies changent, et ce qu'elles ne changent pas

Elles changent beaucoup pour observer. Satellites, drones, InSAR, fibre optique et modèles permettent déjà de surveiller une montagne et de suivre un panache bien mieux qu'en 1991. La Phase 0 et l'observation non invasive peuvent s'appuyer sur des outils qui existent.

Le forage chaud progresse vite, mais loin des conditions visées : les puits en service atteignent 150 à 430 °C et 4 à 5 km ; un réservoir de volcan explosif, c'est 6 à 11 km et 900 °C ou plus.

Elles ne changent rien au verrou central : aucune technologie ne permet aujourd'hui de dessiner le conduit, de mesurer la pression d'une chambre avant d'agir, ni de régler la taille d'une éruption.

Le jalon à suivre : le Krafla Magma Testbed, dont les premiers résultats diront si l'on sait vivre durablement au contact d'un magma [17].

8. Le sursis : ce que le voile ferait, et ne ferait pas

Ce chapitre dit ce que le projet promet, et surtout ce qu'il ne promet pas. Deux mots y sont importants : un **répit** est l'effet d'une seule éruption ; le **sursis** est la fenêtre obtenue en additionnant plusieurs répits.

VU *Ce qu'on a vu*	◆ Pinatubo : ≈ 0,5 °C de baisse moyenne pendant un à deux ans [9, 10]. ◆ **Le choc terminal** : si un voile entretenu longtemps s'interrompait d'un coup, la chaleur masquée reviendrait vite [77, 78].
SUPPOSÉ *Ce qu'on suppose*	◆ **Hypothèse du projet, non testée.** Pour chaque répit : peut-être **0,2 à 0,5 °C, sur 18 à 36 mois** (chiffres inspirés du Pinatubo). ◆ **Sursis visé** : une fenêtre de **2 à 5 ans**, obtenue en additionnant plusieurs répits, « sur une autre montagne, s'il en était une de prête », et seulement « si les règles communes le permettaient ».
IGNORÉ *Ce qu'on ignore*	◆ Si une éruption déclenchée donnerait l'effet d'un Pinatubo, ou moins, ou plus. ◆ Combien de montagnes « prêtes » existeraient au bon moment, et à quel rythme.

Principe du projet

« Le voile soulagerait ; il ne soignerait pas. Puis l'effet s'effacerait. »

« Un sursis, et non un miracle. »

« Un répit ne sert que s'il est utilisé. Et un bouclier qui protège d'un côté peut blesser de l'autre. »

8.1 Ordres de grandeur

Grandeur	Valeur	Statut
Refroidissement après le Pinatubo	≈ 0,5 °C (moyenne mondiale), 1 à 2 ans	VU [9, 10]
Refroidissement visé par répit	0,2 à 0,5 °C, 18 à 36 mois	SUPPOSÉ (hypothèse du projet)
Durée du sursis	2 à 5 ans, par répits successifs sur des montagnes différentes	SUPPOSÉ (hypothèse du projet)
Effet sur le CO_2 et l'acidification des océans	Aucun	VU [30, 31]
Risque d'un voile trop fort	Tambora 1815 : –0,4 à –0,8 °C, « l'année sans été », famines	VU [34, 35]

Le septième pas fixe la règle qui sépare le répit de l'« hiver » : **« on s'arrête bien avant le froid »**. D'où une exigence : les seuils d'arrêt (température, pluies, ozone) devront être **publiés avant toute action**, et non décidés après coup.

9. Risques, limites et questions ouvertes

C'est la section la plus importante du dossier. Le projet s'est construit en écoutant trois objections, que l'on peut appeler « trois voix ». Elles ont raison, et ce sont celles de la science. Le tableau donne chaque objection et la réponse du projet.

Voix	Objection	Réponse du projet
Première voix : les cendres	« Ton feu crachera de la poussière de verre. Les avions n'aiment pas ça. Les gens, en bas, non plus. »	« C'est vrai. Alors on choisit une montagne loin des maisons, et on attend le bon vent. Combien, et jusqu'où ? Je ne le sais pas encore. »
Deuxième voix : la colère du feu	« Et si la montagne répond plus fort que tu ne l'as demandé ? »	« C'est la question qui m'empêche de dormir. Personne ne sait encore régler la voix d'un volcan. Il faut d'abord apprendre à le connaître, et ne rien tenter avant. »
Troisième voix : les pluies et le ciel	« Ton voile rafraîchira l'air. Mais il peut assécher les moussons, et abîmer la couche fragile qui nous garde des rayons trop durs du soleil. »	« Tu as raison. Le Pinatubo l'a fait, pour un temps. Alors on mesure avant d'agir. » Puis, après trois jours : **« Rien sans l'accord de tous. »**

9.1 Tableau des risques

Risque ou limite	Ce que l'on sait	Réponse proposée
Contrôle de la taille et du moment (deuxième voix)	La prévision des éruptions reste probabiliste [13]. Aucun déclenchement volontaire n'a jamais été réalisé. Le risque d'un effet trop fort existe (Tambora [34]).	L'inconnue n° 1. Phase 0 : modélisation avec des volcanologues ; aucun geste sur le terrain sans démonstration préalable.
Populations locales, cendres et aviation (première voix)	Coulées pyroclastiques, cendres, lahars pendant des années (Pinatubo [9]) ; Tambora : plus de 71 000 morts [34].	Montagne loin des maisons ; plans d'évacuation ; consentement libre et éclairé ; fonds de réparation ; coordination avec l'aviation civile.
Ozone (troisième voix)	Le Pinatubo a accru les pertes d'ozone [26]. Une injection soutenue de soufre retarderait de plusieurs décennies la reconstitution du trou d'ozone antarctique [16, 79].	Intégrer l'ozone aux modèles de la Phase 0 ; seuils d'arrêt publiés.
Moussons et pluies (troisième voix)	Après le Pinatubo, baisse record des pluies sur les terres et du débit des fleuves [15]. Effets régionaux importants et mal compris [14].	Modéliser l'Afrique de l'Ouest, le Sahel, l'Asie du Sud ; associer des scientifiques de ces régions.
Choc terminal	Le retour brutal de la chaleur si l'on enchaînait les voiles « sans rien changer en dessous » [77, 78].	Pas de voile permanent ; chaque répit lié à une baisse réelle des émissions.
Vapeur d'eau stratosphérique	L'eau injectée pourrait monter avec le panache et réchauffer (Hunga Tonga [37]).	L'inclure dans les bilans radiatifs.
Séismes et réactions imprévues	Pohang 2017, Lusi 2006 : une intervention humaine peut déclencher un phénomène qu'on ne sait pas arrêter [41, 42].	Surveillance sismique ; critères d'arrêt.
Aléa moral	Un répit pourrait servir de prétexte pour retarder la baisse des émissions [30, 31].	« Un répit ne sert que s'il est utilisé » : JILL n'est qu'un complément.
Droit international	ENMOD (1976) interdit l'usage hostile des techniques de modification de l'environnement [44] ; la CDB demande qu'aucune géo-ingénierie affectant la biodiversité n'ait lieu sans base scientifique suffisante (décision X/33) [45].	Aucune intervention sans cadre multilatéral ; recherche conforme aux principes d'Oxford [46].
Acceptation publique	Même un petit essai en ballon (SCoPEx, Harvard) a été suspendu en 2021, puis annulé en 2024 [80].	Dialogue public dès la Phase 0 ; publication des résultats, y compris négatifs.

Risques et gouvernance : les objections déjà intégrées

Le précédent SCoPEx. Ce projet de l'université Harvard (groupe de Frank Keutsch, avec David Keith) prévoyait en juin 2021 un premier vol de ballon depuis Esrange, à Kiruna (Suède), pour tester le matériel, sans relâcher de particules. En février 2021, le Conseil saami, avec la Société suédoise pour la conservation de la nature, les Amis de la Terre Suède et Greenpeace Suède, en a demandé l'annulation, dénonçant des risques graves et **l'absence de toute consultation** des Saamis et de la société suédoise [81]. Fin mars 2021, le comité consultatif du projet a recommandé de suspendre le vol en attendant un dialogue public, et l'agence spatiale suédoise y a renoncé [82, 83]. Le projet a été définitivement abandonné en mars 2024 [80].

La leçon, appliquée au Projet JILL : consulter et obtenir l'accord **avant** tout essai sur le terrain, même anodin. D'où la Phase 0 sans aucune action sur un volcan, le dialogue public dès le départ et la condition qui précède le premier pas : « Rien sans l'accord de tous ».

Les « effets papillon » climatiques, et la réponse prévue par le projet :

- **Pluies et moussons** : baisse record des pluies sur les terres après le Pinatubo [15] ; effets régionaux mal compris [14]. Réponse : modèles régionaux en Phase 0, chercheurs des régions de mousson associés.
- **Choc terminal** : retour brutal de la chaleur si des voiles enchaînés s'arrêtaient [77, 78]. Réponse : pas de voile permanent ; un répit isolé s'efface de lui-même.
- **Ozone** : pertes accrues après le Pinatubo [26, 79]. Réponse : seuils d'arrêt publiés à l'avance.
- **Vapeur d'eau stratosphérique** : réchauffante (Hunga Tonga) [37]. Réponse : incluse dans les bilans.

Le cadre : les Académies américaines et le PNUE recommandent une recherche prudente, transparente, sous contrôle indépendant, et non un déploiement [30, 31]. La feuille de route du projet suit ce cadre : Phase 0 sans terrain, points de décision « oui, non, ou pas encore », comité scientifique indépendant, publication des résultats négatifs.

9.2 Volcan ou avions : la comparaison avec la recherche SAI

La recherche sur l'injection d'aérosols stratosphériques (SAI) étudie une injection continue et réglable de soufre par avion. Les Académies nationales américaines recommandent un programme de recherche prudent et encadré, non un déploiement [30] ; le PNUE conclut que la SRM pourrait refroidir en quelques années mais crée de nouveaux risques [31]. Au Royaume-Uni, l'agence ARIA finance un programme de 56,8 M£ qui étudie aussi les analogues naturels comme les volcans [84].

Critère	SAI « classique » (avions)	Projet JILL (volcan)
Principe	Un soufre répandu de main d'homme, entretenu	« Un coup de pouce, plutôt qu'un ciel d'usine » : accompagner un volcan qui « allait parler de toute façon » (conviction du projet)
Contrôle de la dose	Réglable en théorie	Fixée par le volcan, non réglable
Arrêt	Possible à tout moment (avec risque de choc terminal)	Impossible une fois l'éruption lancée
Effets locaux	Faibles au sol	Danger local majeur
Ce que le sol reçoit	Du soufre seul	Des cendres qui, avec le temps, forment des andosols, parmi les sols les plus fertiles [85, 86] ; mais aussi les ravages de l'éruption
Coût d'injection	≈ 2,25 G$ par an en moyenne sur les 15 premières années (estimation) [87]	Non estimé de façon indépendante
Maturité	Modèles avancés (GeoMIP) ; aucun déploiement [74, 88]	Idée nouvelle, non évaluée par les pairs

La conclusion va dans le tiroir IGNORÉ : « **Lequel des deux chemins serait le plus sûr : personne ne les a encore comparés, mesures à l'appui.** » La charge de la preuve est claire : il faut d'abord démontrer qu'une éruption peut être accompagnée sans être aggravée.

10. Rien sans l'accord de tous : gouvernance

Principe du projet

« Ce qui touche chaque être vivant sur Terre ne peut se décider qu'avec le monde entier. »

« D'abord, que les savants éprouvent la chaîne, maillon par maillon. Et avant tout geste, que le monde entier décide ensemble qui aurait le droit d'agir. Pas un homme seul. Jamais. »

« Et si la science, un jour, dit non, il faudra l'accepter. [...] Ce ne serait pas une défaite : ce serait une réponse. »

10.1 Principes

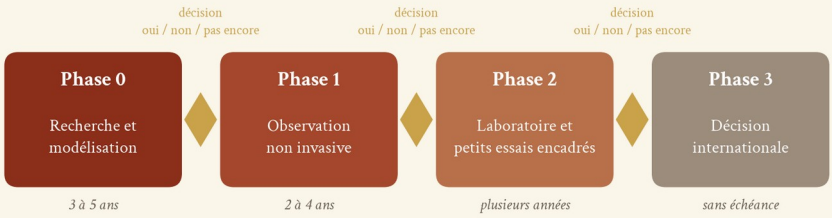
- **Science d'abord** : les savants « éprouvent la chaîne, maillon par maillon ». Conseil scientifique indépendant (volcanologues, climatologues, spécialistes de l'ozone, juristes, éthiciens), avis publics.
- **Décision collective** : aucune intervention sans mandat international, accord de l'État hôte et consentement des populations concernées [44, 45].
- **Transparence** : publication des données, des modèles et des résultats, y compris négatifs [46].
- **Participation** : associer dès la Phase 0 des chercheurs des pays les plus exposés (régions de mousson, Afrique, petits États insulaires) : « ceux qui perdraient la pluie ne seraient peut-être pas ceux qui gagneraient le frais ».
- **Précaution** : tant que la Phase 0 n'a pas conclu, aucune activité sur un volcan.
- **Honnêteté** : ni promesse, ni exagération ; tous les supports du projet reprennent les chiffres de ce dossier.

10.2 La question la plus dure

Le projet ne l'esquive pas : « Et si l'urgence frappe, et que la seule montagne possible a des maisons à son pied ? » Une première réponse serait de dire que ces habitants deviendraient, « par l'accord de tous », des « **sacrifiés climatiques** », à éclairer et à dédommager. Cette réponse ne suffit pas, et c'est elle qui a conduit à poser la condition « Rien sans l'accord de tous ».

Le projet en retient la règle, pas l'exception : **la première règle reste une montagne loin des maisons**. Toute situation où des habitants seraient exposés relèverait d'un débat éthique et juridique international, qui n'a pas eu lieu, et du consentement libre et éclairé des personnes concernées.

11. Feuille de route



Aucune action sur un volcan pendant la Phase 0. Date à guetter : Krafla Magma Testbed (Islande), premier forage conçu pour atteindre le magma, prévu pour 2027.

Durées indicatives. Chaque point de décision peut conclure qu'il faut s'arrêter : « si la science, un jour, dit non, il faudra l'accepter ».

Figure 3. *Feuille de route par phases. Chaque losange est un point de décision : oui, non, ou pas encore.*

La feuille de route avance par **points de décision**, et non par un enchaînement direct « sélection, forage, éruption ». Chaque phase peut conclure qu'il faut s'arrêter ; ce serait un résultat scientifique honorable. Les durées sont indicatives.

Phase	Contenu	Durée indicative	Point de décision
Phase 0 — Recherche et modélisation avec des partenaires scientifiques	Revue de la littérature ; partenariats avec des laboratoires de volcanologie, de climatologie et de science des matériaux ; modélisation climatique d'éruptions « à date choisie » (cadres VolMIP et GeoMIP [43, 74]) ; modélisation de l'interaction eau-magma ; étude de faisabilité technique et économique indépendante ; étude juridique et éthique ; dialogue public. **Aucune action sur le terrain.**	3 à 5 ans	Examen par un comité scientifique indépendant ; publication dans des revues à comité de lecture
Phase 1 — Observation non invasive	Suivi de volcans candidats avec les observatoires nationaux ; mesure du soufre ; collaboration avec des programmes existants (Krafla Magma Testbed [17])	2 à 4 ans	Accord des États hôtes ; données suffisantes pour des modèles fiables
Phase 2 — Études de laboratoire et petits essais encadrés	Matériaux et taillants à haute température ; essais eau-magma en laboratoire ; éventuel forage scientifique d'observation, sans injection	Plusieurs années	Démonstration publique des performances ; avis éthique
Phase 3 — Décision internationale	Toute intervention réelle supposerait un mandat multilatéral, une évaluation d'impact et le consentement des populations concernées	Sans échéance	Peut ne jamais avoir lieu

Livrables de la Phase 0

- Un rapport scientifique public : « Peut-on déclencher une éruption de façon contrôlée ? État des connaissances ».
- Une étude de modélisation : effets sur le climat, l'ozone et les précipitations d'une éruption de type Pinatubo, selon la saison et la latitude.
- Un inventaire des volcans candidats selon les critères de la section 5.1, sans désignation publique tant que les États concernés n'ont pas été consultés.
- Un chiffrage technique indépendant du conduit et de la foreuse.
- Une charte de gouvernance et de transparence du projet.

12. Budget préliminaire

Les chiffres ci-dessous sont des **estimations préliminaires**, et non des devis : ils n'ont pas été validés par des ingénieurs de forage ou des volcanologues, et ils ne comprennent pas la recherche et le développement des technologies classées « au-delà de l'état de l'art » (section 6). Les totaux par phase, le total général et les pourcentages ont été vérifiés. Les lignes marquées ◇ (33,565 M€ au total) sont des postes proposés à partir des besoins identifiés dans ce dossier : recherche de la Phase 0, surveillance, sûreté, assurance, revue indépendante, gouvernance et réserve.

Répartition proposée — chiffres préliminaires

Les lignes marquées ◇ sont une **proposition** : 7,390 M€ en phase 1, 20,175 M€ en phase 2, 6,000 M€ en phase 3. Elles n'ont fait l'objet d'aucun devis et seront revues avec des partenaires scientifiques et des ingénieurs. Total général : 390,815 M€ (84 / 10 / 6 % par phase).

12.1 Budget consolidé

Phase	Montant (M€)	Part du total
Phase 1 — Sélection et préparation	328,390	84,0 %
Phase 2 — Opérations sur site	38,925	10,0 %
Phase 3 — Suivi et planification future	23,500	6,0 %
Total estimé	**390,815**	**100,0 %**

12.2 Détail par phase

Le détail est présenté phase par phase, un tableau par phase.

Poste	M€	% de la phase	% du total
Phase 1 — Sélection et préparation			
Foreuse ultra-renforcée avec refroidissement	163,000	49,6 %	41,7 %
Conduit principal et sas (alliages type Inconel, installation, maintenance, imprévus)	120,000	36,5 %	30,7 %
Systèmes auxiliaires : robots (15 à 20 M€), cryogénisation, IA, capteurs	30,000	9,1 %	7,7 %
Logistique et infrastructures temporaires	8,000	2,4 %	2,0 %
◇ *Recherche et modélisation préalables avec des partenaires (Phase 0 de la feuille de route)*	3,000	0,9 %	0,8 %
◇ **Budget de sécurité** : conception du système d'alerte précoce et d'arrêt d'urgence, plans d'évacuation préalables	1,200	0,4 %	0,3 %
◇ *Imagerie du réservoir, études de sûreté et d'environnement*	1,000	0,3 %	0,3 %
◇ *Gouvernance : consultation des populations, cadre juridique et éthique*	1,000	0,3 %	0,3 %
◇ *Revue scientifique et technique indépendante (comité, contre-expertise des devis)*	0,600	0,2 %	0,2 %
◇ *Réserve pour imprévus*	0,590	0,2 %	0,2 %
Sous-total phase 1	**328,390**	**100,0 %**	**84,0 %**

Poste	M€	% de la phase	% du total
Phase 2 — Opérations sur site			
Forage préliminaire et installation des sas	10,000	25,7 %	2,6 %
Sécurité et gestion des équipes	3,750	9,6 %	1,0 %
Injection d'eau sous pression (pompes, refroidissement)	2,000	5,1 %	0,5 %
Surveillance post-injection	3,000	7,7 %	0,8 %
◇ **Budget de sécurité — drones de surveillance** : inspection du cratère, mesure du panache et suivi du SO_2 ; aucune injection (détail en 12.4)	1,500	3,9 %	0,4 %
◇ **Budget de sécurité** : surveillance et alerte précoce (2,0) ; évacuation et protection des populations (2,0) ; provision pour assurance et réparation des dommages (9,0) ; capacité d'arrêt d'urgence de l'injection (1,0)	14,000	36,0 %	3,6 %
◇ *Instrumentation scientifique du volcan (sismique, déformation, gaz)*	1,500	3,9 %	0,4 %
◇ *Coordination avec l'aviation civile et alerte aux cendres*	0,500	1,3 %	0,1 %
◇ *Revue indépendante des opérations de terrain*	0,600	1,5 %	0,2 %
◇ *Réserve pour imprévus*	2,075	5,3 %	0,5 %
Sous-total phase 2	**38,925**	**100,0 %**	**10,0 %**

Poste	M€	% de la phase	% du total
Phase 3 — Suivi et planification future			
Surveillance post-opérationnelle immédiate	4,500	19,1 %	1,2 %
Suivi climatique à long terme	3,000	12,8 %	0,8 %
Études écologiques et restauration	7,000	29,8 %	1,8 %
Cadre standardisé pour de futures interventions	3,000	12,8 %	0,8 %
◇ **Budget de sécurité** : surveillance après l'éruption, alerte aux lahars, protection des vallées exposées	1,500	6,4 %	0,4 %
◇ *Suivi de l'ozone, des pluies et de la santé (satellites, ballons, réseaux au sol)*	1,500	6,4 %	0,4 %
◇ *Évaluation indépendante et publication des résultats, y compris négatifs*	1,200	5,1 %	0,3 %
◇ *Restitution aux populations et gouvernance du suivi*	0,800	3,4 %	0,2 %
◇ *Réserve pour imprévus*	1,000	4,3 %	0,3 %
Sous-total phase 3	**23,500**	**100,0 %**	**6,0 %**
Total des trois phases	**390,815**		**100,0 %**

12.3 Budget de sécurité (proposition)

Le budget de sécurité regroupe tout ce qui protège les personnes : surveillance et alerte précoce, plans d'évacuation, provision pour assurance et réparation, et capacité d'arrêter l'injection en urgence. Il est isolé pour qu'on puisse le suivre et le contrôler séparément. **Proposition, chiffres préliminaires.**

Phase	Budget de sécurité (M€)	% de la phase	Contenu
Phase 1	1,200	0,4 %	Conception de l'alerte précoce et de l'arrêt d'urgence ; plans d'évacuation préparés avec les autorités
Phase 2	15,500	39,8 %	Drones de surveillance 1,5 ; surveillance et alerte 2,0 ; évacuation 2,0 ; assurance et réparation 9,0 ; arrêt d'urgence de l'injection 1,0
Phase 3	1,500	6,4 %	Surveillance après l'éruption ; alerte aux lahars, qui ont frappé pendant des années après le Pinatubo [9]
Total	**18,200**	**4,7 % du total**	

Limite à dire clairement : l'« arrêt d'urgence » ne concerne que l'injection et le puits (obturateurs, arrêt du pompage). Une fois une éruption lancée, personne ne sait l'arrêter.

Les pourcentages sont arrondis à 0,1 %. ◇ = poste proposé, sans devis. Postes de base : phase 1 321,000 M€ ; phase 2 18,750 M€ ; phase 3 17,500 M€. Postes proposés : 7,390 ; 20,175 ; 6,000 M€.

12.4 Drones de surveillance : rôle et estimation

Les drones du projet servent uniquement à **observer** : inspecter le cratère, mesurer la composition du panache (SO_2, CO_2, H_2S) et son débit, et suivre le nuage après l'éruption, là où des équipes au sol seraient en danger. **Ils n'injectent rien.** Cette technique est éprouvée : au Manam, des drones à voilure fixe ont volé hors de vue jusqu'au panache avec un analyseur MultiGAS de 550 g, et ces mesures ont réduit les incertitudes des mesures faites depuis le sol [71, 72]. Les satellites (TROPOMI) complètent ce suivi chaque jour, avec des données en accès libre, non comptées ici [69, 70].

Poste	M€	Base de l'estimation
Drones longue portée à voilure fixe (2 à 3), analyseurs MultiGAS, spectromètres UV, pièces de rechange	0,35	Coût d'un drone : de quelques centaines à quelques dizaines de milliers de dollars selon les besoins [89]
Drones légers pour l'inspection du cratère (une dizaine)	0,05	≈ 3 500 € pour un système léger complet [73]
Capteurs au sol complémentaires (caméras UV à SO_2, spectromètres)	0,25	Méthode combinée au Manam [71]
Équipes : pilotes, volcanologues, traitement des données, sur environ 3 ans de campagnes	0,60	Estimation du projet
Autorisations de vol hors de vue, assurance, logistique, remplacement d'appareils perdus	0,25	Un vol sur trois analysés au Manam a échoué dans la turbulence [72]
Total drones de surveillance	**1,50**	

Ordres de grandeur établis à partir de coûts publiés ; ce ne sont pas des devis.

12.5 Lecture critique

- **La Phase 0 dispose d'une ligne de 3 M€.** C'est un point de départ, probablement insuffisant : pour comparaison, les Académies américaines ont recommandé 100 à 200 M$ sur cinq ans pour un programme national de recherche sur la SRM [30], et le programme britannique ARIA dispose de 56,8 M£ [84]. Le montant réel est à établir avec les partenaires.
- **Le coût réel d'un forage jusqu'à une chambre magmatique est inconnu.** Kola a demandé une vingtaine d'années de travaux [22, 47]. Les 163 M€ et 120 M€ prévus doivent être confrontés à des devis de foreurs géothermiques.
- **La provision pour assurance et réparation (9 M€, dans le budget de sécurité) reste indicative.** Après le Pinatubo, les lahars ont causé des dégâts pendant des années [9] : le coût réel d'un dommage ne peut pas être borné aujourd'hui, et une couverture sérieuse devrait être chiffrée par des assureurs et garantie par les États concernés.
- **Les drones ne servent qu'à observer.** Le projet n'injecte aucun soufre par avion ni par drone : ce serait une autre méthode (SAI), contraire au principe « un coup de pouce, plutôt qu'un ciel d'usine », et porter une charge à 18-25 km exigerait des avions qui n'existent pas encore [87]. Les drones mesurent ; le volcan seul fournit le soufre.
- La comparaison avec les missions spatiales de plus de 10 milliards d'euros est juste en ordre de grandeur, mais elle ne prouve pas que le projet est « abordable » : son coût total reste à établir.

13. Stratégie de financement

Le Projet JILL est une **initiative citoyenne**, portée par des contributions bénévoles et citoyennes. Il envisage quatre sources complémentaires, ordonnées selon la feuille de route : **le premier argent doit financer la recherche (Phase 0), et rien d'autre.**

Source	Exemples	Usage réaliste à court terme
Institutions internationales et gouvernements	Banque mondiale, ONU, Fonds vert pour le climat (GCF)	Ces fonds financent aujourd'hui l'atténuation et l'adaptation ; l'éligibilité d'un projet de géo-ingénierie reste à vérifier et paraît peu probable. Les agences nationales de recherche sont des interlocuteurs plus naturels pour la Phase 0.
Fondations et ONG	Fondations philanthropiques consacrées au climat et à la science	Financement de la Phase 0 : études, modélisation, dialogue public
Secteur privé	Industrie du forage, des matériaux, de la géothermie	Partenariats techniques en nature (matériaux, essais) ; transparence totale sur les intérêts
Initiative citoyenne : contribution bénévole et citoyenne	Dons de particuliers, bénévolat, soutien de citoyens partout dans le monde	Financement de la Phase 0 et de la vulgarisation ; comptes publiés ; aucune promesse de résultat

Initiative citoyenne : nos engagements envers chaque contributeur

- Dire clairement à chaque donateur que sa contribution finance de la recherche, et non une éruption.
- Publier chaque année les comptes, vérifiés par un tiers.
- Ne jamais présenter le projet comme une solution garantie.
- Placer les fonds dans une structure juridique adaptée (association ou fondation), dotée d'un conseil scientifique indépendant.

13.1 Rejoindre le Projet JILL

Le Projet JILL recherche des partenaires scientifiques, techniques, financiers et institutionnels. Le besoin le plus urgent : **des chercheurs prêts à examiner l'hypothèse et à dire, preuves à l'appui, si elle tient ou non.**

Contact : Nassim Anane, fondateur · nassim.anane@gmail.com · www.projetjill.com

Glossaire

Terme	Définition
Aérosols sulfatés	Fines gouttelettes formées à partir du dioxyde de soufre, qui renvoient vers l'espace une partie du rayonnement solaire. Moins de lumière atteint le sol.
Andosols	Sols formés sur les cendres volcaniques ; ils comptent parmi les sols les plus fertiles du monde.
Chambre magmatique	Réservoir, à quelques kilomètres de profondeur sous certains volcans, où le magma s'accumule.
Choc terminal	Retour brutal de la chaleur si un voile entretenu longtemps s'interrompait d'un coup (en anglais, *termination shock*).
Dioxyde de soufre (SO_2)	Gaz dissous dans le magma, libéré lors des éruptions. Envoyé assez haut, il voile le ciel.
Éruption phréatomagmatique	Éruption née de la rencontre de l'eau et du magma : l'eau devient vapeur et brise le magma en cendres fines.
Fluide supercritique	État de l'eau au-delà de 374 °C et d'environ 22 MPa : ni liquide ni vapeur.
Forçage radiatif	Modification du bilan d'énergie de la Terre, en watts par mètre carré ; négatif quand le voile renvoie de la lumière vers l'espace.
Lahar	Coulée de boue volcanique, mélange de cendres et d'eau ; au Pinatubo, plus destructrice pendant des années que l'éruption elle-même.
Magma	Roche fondue, le plus souvent entre 700 et 1 300 °C.
Panache	Colonne de gaz et de cendres qu'un volcan projette vers le ciel.
Répit / sursis	Termes du projet : le répit est l'effet d'une éruption (hypothèse : 0,2-0,5 °C sur 18-36 mois) ; le sursis, la fenêtre de 2 à 5 ans obtenue par répits successifs.
SAI / SRM	Injection d'aérosols stratosphériques (*Stratospheric Aerosol Injection*), famille de la modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Modification*).
Stratosphère	Couche de l'atmosphère au-dessus des nuages et de la pluie, qui commence vers 8 à 18 km d'altitude selon la latitude. C'est là que le panache doit monter pour que le voile dure.
Tropopause	Le plafond qui sépare la troposphère de la stratosphère.
Troposphère	La couche la plus basse de l'atmosphère : celle de nos nuages et de nos pluies.

Références

Références numérotées dans l'ordre de leur première citation. Adresses vérifiées le 17 novembre 2026 (accès direct ou résolution du DOI). Certains éditeurs bloquent les accès automatisés ; les DOI renvoient alors vers la page officielle de l'article.

[1] Anane, N. (2026). *Projet JILL — Le Chevalier des Volcans et la Promesse du Feu Maîtrisé*. Récit, 98 p. (avec ses « Repères » sourcés). www.projetjill.com

[2] Copernicus Climate Change Service (C3S/ECMWF) (janvier 2025). *Global Climate Highlights 2024*. https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024

[3] OMM / WMO (10 janvier 2025). « WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level ». https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level

[4] Nations unies, CCNUCC (2015). *Accord de Paris*, article 2. https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf

[5] GIEC / IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe I à l'AR6, Résumé à l'intention des décideurs (A.1.2). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

[6] Copernicus (C3S) et OMM (avril 2025). *European State of the Climate 2024*. https://climate.copernicus.eu/esotc/2024

[7] Self, S. et al. (1996). « The Atmospheric Impact of the 1991 Mount Pinatubo Eruption », dans *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (PHIVOLCS / University of Washington Press). https://pubs.usgs.gov/pinatubo/self/

[8] NASA Earth Observatory. « Global Effects of Mount Pinatubo ». https://earthobservatory.nasa.gov/images/1510/global-effects-of-mount-pinatubo

[9] Newhall, C., Hendley, J. W., Stauffer, P. H. (1997). *The Cataclysmic 1991 Eruption of Mount Pinatubo, Philippines*. USGS Fact Sheet 113-97. https://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs113-97/

[10] Hansen, J. et al. (1992). Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption. *Geophysical Research Letters*, 19(2). https://doi.org/10.1029/91GL02788

[11] Elders, W. A. et al. (2011). Origin of a rhyolite that intruded a geothermal well while drilling at the Krafla volcano, Iceland. *Geology*, 39(3). https://doi.org/10.1130/G31393.1

[12] Teplow, W. et al. (2009). Dacite Melt at the Puna Geothermal Venture Wellfield, Big Island of Hawaii. *Geothermal Resources Council Transactions*, 33, 989-994. https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1028595.pdf

[13] Sparks, R. S. J. (2003). Forecasting volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00124-9

[14] Lee, J.-Y., Marotzke, J. et al. (2021). Chapitre 4, « Future Global Climate », section 4.6.3 (modification du rayonnement solaire), IPCC AR6 WG I. doi:10.1017/9781009157896.006. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-4/

[15] Trenberth, K. E., Dai, A. (2007). Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 34. https://doi.org/10.1029/2007GL030524

[16] Tilmes, S., Müller, R., Salawitch, R. (2008). The Sensitivity of Polar Ozone Depletion to Proposed Geoengineering Schemes. *Science*, 320. https://doi.org/10.1126/science.1153966

[17] Krafla Magma Testbed (KMT). Site officiel du projet. https://kmt.is/

[18] Bluth, G. J. S. et al. (1992). Global tracking of the SO_2 clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions. *Geophysical Research Letters*, 19(2). https://doi.org/10.1029/91GL02792

[19] USGS, *Living with a Volcano in Your Backyard* (GIP 19), annexe « Volcanism in a Plate Tectonics Perspective » (fusion vers 1 300 °C ; magmas de surface jusqu'à ~700 °C). https://pubs.usgs.gov/gip/19/downloads/Appendixes/I_Volcanism%20in%20a%20Plate%20Tectonics%20Perspective.pdf

[20] National Geographic Society. « Magma » (températures des magmas basaltique, andésitique et rhyolitique). https://education.nationalgeographic.org/resource/magma/

[21] NIST Chemistry WebBook, « Thermophysical Properties of Fluid Systems » (propriétés de l'eau et de la vapeur). https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/

[22] Kozlovsky, Ye. A. (dir.) (1987). *The Superdeep Well of the Kola Peninsula*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-71137-4

[23] USGS. « How many active volcanoes are there on Earth? » (≈ 1 350 volcans potentiellement actifs). https://www.usgs.gov/faqs/how-many-active-volcanoes-are-there-earth

[24] UNESCO, Centre du patrimoine mondial. « Surtsey ». https://whc.unesco.org/en/list/1267

[25] Wu, J. et al. (2025). Low sulfur emissions from 2022 Hunga eruption due to seawater–magma interactions. *Nature Geoscience*, 18, 518-524. https://doi.org/10.1038/s41561-025-01691-7

[26] McCormick, M. P., Thomason, L. W., Trepte, C. R. (1995). Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 373. https://doi.org/10.1038/373399a0

[27] OMM / WMO (2025). *State of the Global Climate 2024* (OMM-n° 1368). https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024

[28] Copernicus Climate Change Service. « Surface air temperature for February 2024 » (+1,77 °C). https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-february-2024

[29] Copernicus Climate Change Service. « Surface air temperature for January 2025 » (+1,75 °C). https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-january-2025

[30] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021). *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*. https://doi.org/10.17226/25762

[31] PNUE / UNEP (2023). *One Atmosphere: An Independent Expert Review on Solar Radiation Modification Research and Deployment*. https://www.unep.org/resources/report/Solar-Radiation-Modification-research-deployment

[32] Guo, S. et al. (2004). Re-evaluation of SO_2 release of the 15 June 1991 Pinatubo eruption using ultraviolet and infrared satellite sensors. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5. https://doi.org/10.1029/2003GC000654

[33] Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2). https://doi.org/10.1029/1998RG000054

[34] Oppenheimer, C. (2003). Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography*, 27(2). https://doi.org/10.1191/0309133303pp379ra

[35] Raible, C. C. et al. (2016). Tambora 1815 as a test case for high impact volcanic eruptions: Earth system effects. *WIREs Climate Change*, 7, 569-589. https://doi.org/10.1002/wcc.407

[36] Proud, S. R., Prata, A. T., Schmauß, S. (2022). The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano reached the mesosphere. *Science*, 378. https://doi.org/10.1126/science.abo4076

[37] Millán, L. et al. (2022). The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Hydration of the Stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 49. https://doi.org/10.1029/2022GL099381

[38] Mastin, L. G. et al. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008

[39] Elders, W. A., Friðleifsson, G. Ó., Pálsson, B. (2014). Iceland Deep Drilling Project: The first well, IDDP-1, drilled into magma. *Geothermics*, 49. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.08.012

[40] Friðleifsson, G. Ó. et al. (2017). The Iceland Deep Drilling Project 4.5 km deep well, IDDP-2, in the seawater-recharged Reykjanes geothermal field in SW Iceland has successfully reached its supercritical target. *Scientific Drilling*, 23. https://doi.org/10.5194/sd-23-1-2017

[41] Grigoli, F. et al. (2018). The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science*, 360. https://doi.org/10.1126/science.aat2010

[42] Davies, R. J. et al. (2007). Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006. *GSA Today*, 17(2). https://doi.org/10.1130/GSAT01702A.1

[43] Zanchettin, D. et al. (2016). The Model Intercomparison Project on the climatic response to Volcanic forcing (VolMIP). *Geoscientific Model Development*, 9. https://doi.org/10.5194/gmd-9-2701-2016

[44] Nations unies (1976). Convention sur l'interdiction d'utiliser des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou toutes autres fins hostiles (ENMOD). Collection des traités des Nations unies. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVI-1&chapter=26&clang=_en

[45] Convention sur la diversité biologique (2010). Décision X/33, « Diversité biologique et changements climatiques », paragraphe 8(w). https://www.cbd.int/decision/cop/?id=12299

[46] Rayner, S. et al. (2013). The Oxford Principles. *Climatic Change*, 121. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0675-2

[47] Wikipédia (anglais). « Kola Superdeep Borehole » (synthèse secondaire : 12 262 m en 1989 ; ≈ 180 °C au fond). https://en.wikipedia.org/wiki/Kola_Superdeep_Borehole

[48] Quaise Energy (22 juillet 2025). « Quaise Energy Achieves Drilling Milestone with Millimeter Wave Technology ». https://www.quaise.com/news/quaise-energy-achieves-drilling-milestone-with-millimeter-wave-technology

[49] Special Metals Corporation. *INCONEL® alloy 718*, fiche technique. https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf

[50] Royal Society of Chemistry. *Periodic Table*, « Tungsten » (point de fusion : 3 414 °C). https://periodic-table.rsc.org/element/74/tungsten

[51] Ortega, A., Glowka, D. A. (1984). Frictional Heating and Convective Cooling of Polycrystalline Diamond Drag Tools During Rock Cutting. *Society of Petroleum Engineers Journal*. https://doi.org/10.2118/11061-PA

[52] Pallister, J. S., Hoblitt, R. P., Meeker, G. P., Knight, R. J., Siems, D. F. (1996). « Magma Mixing at Mount Pinatubo: Petrographic and Chemical Evidence from the 1991 Deposits », dans *Fire and Mud* (PHIVOLCS / University of Washington Press). https://pubs.usgs.gov/pinatubo/pallister/

[53] Pallister, J. S., Hoblitt, R. P., Reyes, A. G. (1992). A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo volcano? *Nature*, 356, 426-428. https://doi.org/10.1038/356426a0

[54] Rutherford, M. J., Sigurdsson, H., Carey, S., Davis, A. (1985). The May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens: 1. Melt composition and experimental phase equilibria. *Journal of Geophysical Research*, 90(B4), 2929-2947. https://doi.org/10.1029/JB090iB04p02929

[55] Rasmussen, D. J., Plank, T. A., Roman, D. C., Zimmer, M. M. (2022). Magmatic water content controls the pre-eruptive depth of arc magmas. *Science*, 375, 1169-1172. https://doi.org/10.1126/science.abm5174

[56] Huber, C., Townsend, M., Degruyter, W., Bachmann, O. (2019). Optimal depth of subvolcanic magma chamber growth controlled by volatiles and crust rheology. *Nature Geoscience*, 12, 762-768. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0415-6

[57] Wallace, P. J. (2001). Volcanic SO_2 emissions and the abundance and distribution of exsolved gas in magma bodies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108, 85-106. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00279-1

[58] Woods, A. W. (1988). The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 50, 169-193. https://doi.org/10.1007/BF01079681

[59] Krafla Magma Testbed. « About » : forages KMT-I (puits d'observation de 2 100 m) et KMT-II. https://kmt.is/about-old/

[60] AAPG Explorer. « Drilling into Magma » (entretien avec B. Þ. Guðmundsson, directeur du KMT). https://www.aapg.org/news-and-media/explorer/drilling-into-magma/

[61] Quaise Energy (juillet 2026). « Quaise Energy Raises $134 Million in First Close of Series B to Build World's First Superhot Geothermal Power Plant ». Communiqué. https://www.quaise.com/news/quaise-energy-raises-134-million-in-first-close-of-series-b-to-build-worlds-first-superhot-geothermal-power-plant

[62] Norbeck, J. H. & Latimer, T. M. (2023). Commercial-Scale Demonstration of a First-of-a-Kind Enhanced Geothermal System. *EarthArXiv* (prépublication). https://doi.org/10.31223/X52X0B

[63] Chamarczuk, M. et al. (2025). Insights Into Seismicity Associated With Flexibly Operating Enhanced Geothermal System From Real-Time Distributed Acoustic Sensing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2025JB031634. https://doi.org/10.1029/2025JB031634

[64] Eavor Technologies (4 décembre 2025). « Eavor Technologies Achieves First Electricity Production at Geretsried Site ». Communiqué. https://eavor.com/press-releases/eavor-technologies-achieves-first-electricity-production-at-geretsried-site/

[65] Drilling Contractor (2026). « Eavor-Loop project in Germany illustrates feasibility, scalability of 'geothermal anywhere' ». https://drillingcontractor.org/eavor-loop-project-in-germany-illustrates-feasibility-scalability-of-geothermal-anywhere-77995

[66] Neudeck, P. G. et al. (2018). Year-long 500 °C Operational Demonstration of Up-scaled 4H-SiC JFET Integrated Circuits. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 15, 163-170. https://doi.org/10.4071/imaps.729648

[67] Biggs, J. et al. (2014). Global link between deformation and volcanic eruption quantified by satellite imagery. *Nature Communications*, 5, 3471. https://doi.org/10.1038/ncomms4471

[68] Tanaka, H. K. M. et al. (2014). Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nature Communications*, 5, 3381. https://doi.org/10.1038/ncomms4381

[69] Theys, N. et al. (2017). Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: algorithm theoretical basis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 119-153. https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017

[70] Copernicus / ESA. Sentinel-5P Mission (SentiWiki) : couverture quotidienne, fauchée d'environ 2 600 km. https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s5p-mission ; données en accès libre : https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-5p

[71] Liu, E. J. et al. (2020). Aerial strategies advance volcanic gas measurements at inaccessible, strongly degassing volcanoes. *Science Advances*, 6, eabb9103. https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9103

[72] Wood, K. et al. (2020). BVLOS UAS Operations in Highly-Turbulent Volcanic Plumes. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 549716. https://doi.org/10.3389/frobt.2020.549716

[73] Karbach, N. et al. (2022). Observing volcanoes with drones: studies of volcanic plume chemistry with ultralight sensor systems. *Scientific Reports*, 12, 17890. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21935-5

[74] Kravitz, B. et al. (2011). The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters*, 12. https://doi.org/10.1002/asl.316

[75] Sellitto, P. et al. (2022). The unexpected radiative impact of the Hunga Tonga eruption of 15th January 2022. *Communications Earth & Environment*, 3, 288. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00618-z

[76] Dempsey, D. E. et al. (2020). Automatic precursor recognition and real-time forecasting of sudden explosive volcanic eruptions at Whakaari, New Zealand. *Nature Communications*, 11, 3562. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17375-2

[77] Parker, A., Irvine, P. J. (2018). The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering. *Earth's Future*, 6. https://doi.org/10.1002/2017EF000735

[78] Trisos, C. H. et al. (2018). Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination. *Nature Ecology & Evolution*, 2. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0431-0

[79] OMM / PNUE (2022). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022* (chapitre 6, injection d'aérosols stratosphériques). https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/

[80] Keutsch Group, Université Harvard. « SCoPEx » (essai prévu en Suède en 2021, non réalisé ; projet annulé en mars 2024). https://www.keutschgroup.com/scopex

[81] Conseil saami (Sámiráđđi) (février 2021). « Open letter requesting cancellation of plans for geoengineering related test flights in Kiruna ». https://www.saamicouncil.net/news-archive/open-letter-requesting-cancellation-of-plans-for-geoengineering

[82] Swedish Space Corporation (31 mars 2021). « No technical test flight for SCoPEx from Esrange ». https://sscspace.com/news/no-technical-test-flight-for-scopex-from-esrange/

[83] Temple, J. (31 mars 2021). « Geoengineering researchers have halted plans for a balloon launch in Sweden ». *MIT Technology Review*. https://www.technologyreview.com/2021/03/31/1021479/harvard-geoengineering-balloon-experiment-sweden-suspended-climate-change/

[84] ARIA (Advanced Research and Invention Agency, Royaume-Uni). « Exploring Climate Cooling » (programme de 56,8 M£). https://www.aria.org.uk/opportunity-spaces/future-proofing-our-climate-and-weather/exploring-climate-cooling

[85] FAO (2001). *Lecture Notes on the Major Soils of the World* (Driessen, Deckers, Spaargaren, Nachtergaele, dir.), « Andosols ». https://www.fao.org/4/y1899e/y1899e00.htm

[86] USGS. « What are some benefits of volcanic eruptions? ». https://www.usgs.gov/faqs/what-are-some-benefits-volcanic-eruptions

[87] Smith, W., Wagner, G. (2018). Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environmental Research Letters*, 13. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae98d

[88] Kravitz, B., MacMartin, D. G. (2020). Uncertainty and the basis for confidence in solar geoengineering research. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1. https://doi.org/10.1038/s43017-019-0004-7

[89] James, M. R. et al. (2020). Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges. *Volcanica*, 3(1), 67-114. https://doi.org/10.30909/vol.03.01.67114

◆ ◆

Projet JILL — pour Jill, et pour tous les enfants du monde.