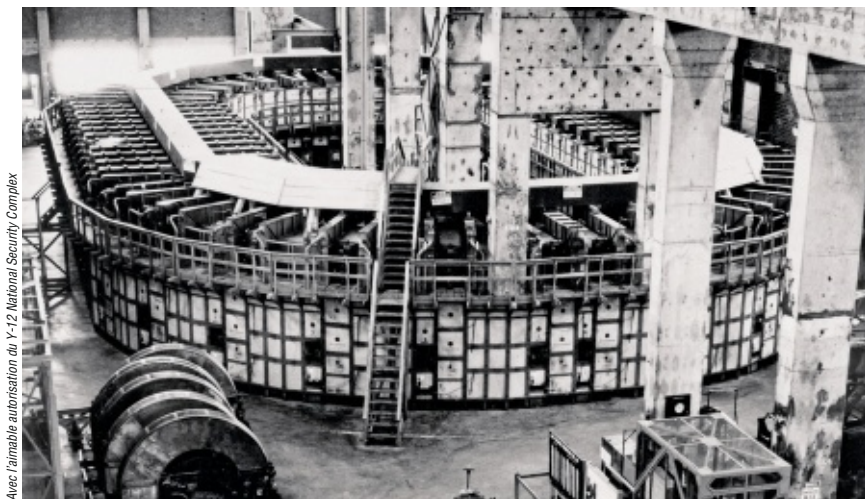
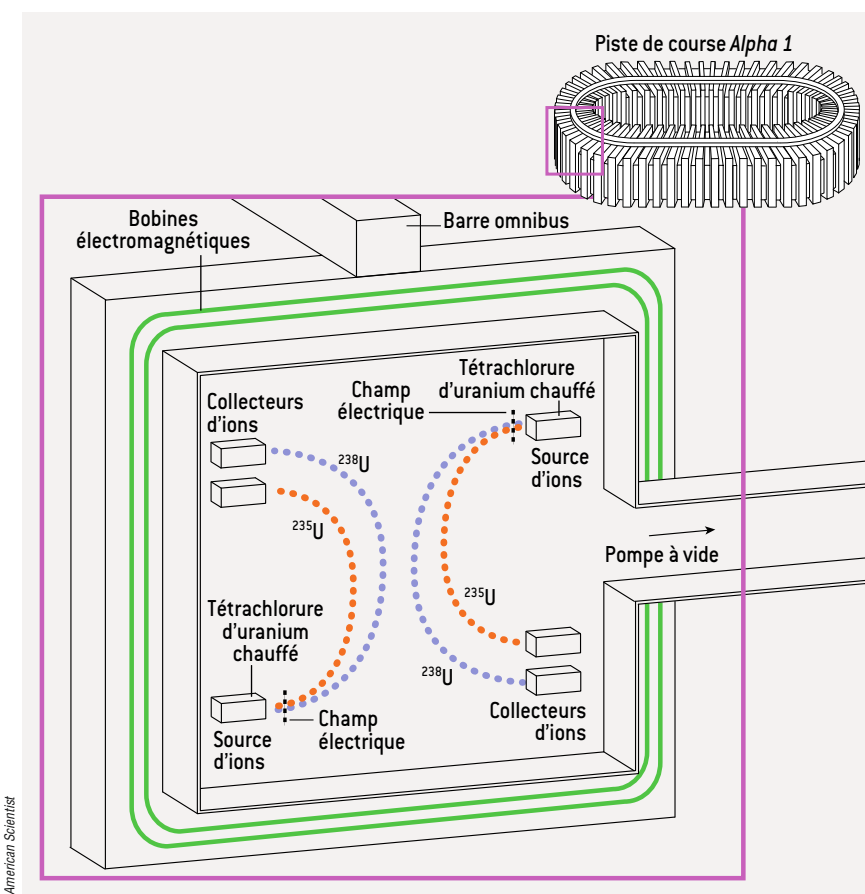




Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

2. À L'USINE Y-12, LES CALUTRONS, enceintes qui, à partir d'uranium naturel, séparaient l'uranium fissile (^{235}U) nécessaire pour fabriquer la bombe de l'uranium non fissile (^{238}U), étaient groupés en énormes « pistes de course » pour optimiser la production.



American Scientist

3. DANS UN CALUTRON, du tétrachlorure d'uranium était vaporisé par chauffage, ce qui créait des ions de charge positive. Accéléré par un champ électrique, le faisceau d'ions pénétrait dans une enceinte à vide où il était courbé par le champ magnétique créé par un solénoïde – une bobine d'argent parcourue d'un courant. L'uranium 238, de masse atomique légèrement supérieure à celle de l'uranium 235, conduit à une trajectoire moins courbe que l'uranium 235, ce qui sépare les deux isotopes.

moins. Par exemple, pour trier les ions de tétrachlorure d'uranium, le champ magnétique doit être parfaitement uniforme. En outre, une grande proportion d'ions s'écrasent sur les parois internes des enceintes et doivent être récupérés en raclant les parois. Dès lors, le rendement de collecte n'est que d'environ dix pour cent. Par ailleurs, les variations thermiques des vitesses initiales des faisceaux. Et pour compliquer encore les choses, la différence de masse entre les deux isotopes est si faible (un pour cent), que leur séparation nécessite un champ magnétique extrêmement puissant. Enfin, les faisceaux ioniques, de même charge, se repoussent l'un l'autre, ce qui écarte leurs trajectoires des courbes idéales. Cet effet limite la production à 100 milligrammes d'uranium 235 par enceinte et par jour. Pour produire les 50 kilogrammes nécessaires pour une bombe atomique, Y-12 doit ainsi s'équiper de plus de 1 000 enceintes, dont la plupart contiennent plusieurs sources d'ions.

1 152 enceintes à construire

Début 1943, Groves autorise la construction de cinq unités d'enrichissement *Alpha-I*, contenant chacune 96 enceintes (et bobines) carrées. Les enceintes sont empilées en configurations ovales nommées « pistes de course » (voir la figure 2). Mais les enceintes situées dans les coudes des pistes sont difficiles à réguler. À l'automne 1943, quatre pistes de course *Alpha-II*, rectangulaires cette fois, sont ajoutées au dispositif, contenant également 96 enceintes et utilisant des bobines en forme de D. Les dispositifs *Alpha* ne fournissant un enrichissement en uranium 235 que de 15 pour cent, Groves approuve en outre la construction de huit unités *Bêta*, plus petites, qui enrichissent à leur tour l'uranium sorti des unités *Alpha* pour atteindre 90 pour cent, la qualité militaire requise pour la bombe (la dernière unité *Bêta* n'entrera en service qu'une fois la guerre terminée, fin 1945). Finalement, les neuf unités *Alpha* et les huit *Bêta* contiennent un total de 1 152 enceintes.

C'est là qu'entre en jeu l'argent du ministère des Finances. Le métal est nécessaire pour produire les bobines des solénoïdes géants des calutrons. Dans les unités *Alpha*, compte tenu de la vitesse que l'on peut donner aux ions, si l'on veut séparer d'au moins un centimètre les trajectoires des deux isotopes, les solénoïdes doivent engendrer un champ magnétique d'intensité suffisante pour imposer aux ions des trajectoires d'environ trois mètres de diamètre. Ce sera donc la taille des bobines, qui, avec 30 enroulements chacune, devront être alimentées d'un courant de 30 000 ampères pour fournir le champ requis. Au pic de son activité, durant l'été 1945, le site de Clinton Engineer Works consummera ainsi environ un pour cent de toute l'électricité produite aux États-Unis, dont une grande partie circule dans les bobines d'argent des unités d'enrichissement.

Le ministre de la Guerre Henry Stimson fait officiellement la demande de cet argent dans une lettre au ministre des Finances Henry Morgenthau le 29 août 1942, indiquant que le projet « est d'une nature très secrète ». Sa lettre stipule que l'argent doit être titré à 0,999, qu'il restera aux États-Unis, et que tout le métal précieux reçu par le Département de la Guerre sera restitué en quantité, forme et titre identiques à l'endroit d'où il aura été prélevé. La date limite de restitution est fixée à cinq ans après réception, à moins qu'une notification écrite du Trésor raccourcisse ce délai pour des raisons connexes aux besoins monétaires des États-Unis. Stimson assure Morgenthau que le métal ne sera utilisé que dans des usines du gouvernement.

Le Département de la Guerre retire au total plus de 400 000 lingots d'environ 31,1 kilogrammes d'argent titré à plus de 0,999 (moins de 1 pour 1 000 d'impuretés) du dépôt de métaux précieux de West Point, dans l'État de New York. Le 30 octobre 1942, les premiers lingots sont transportés par camion une centaine de kilomètres au Sud, jusqu'à une installation de la *U.S. Metals Refining Company*, à Carteret, dans le New Jersey. Le jour suivant, l'usine commence à couler les lingots en billettes, de longues barres cylindriques moulées pesant environ

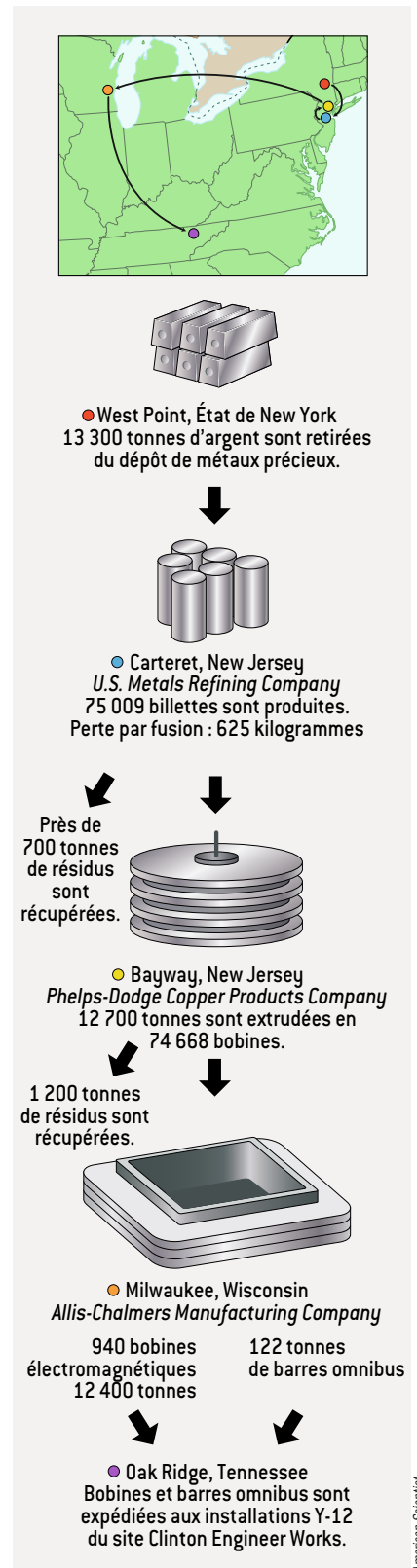
180 kilogrammes chacune. En janvier 1944, un peu plus de 75 000 billettes ont été coulées, pour une masse totale approchant les 14 000 tonnes. Ce poids dépasse les quelque 13 000 tonnes retirées du Trésor, car avant le coulage des billettes, les machines, outils, hauts-fourneaux, ateliers et zones de stockage de l'usine de raffinage ont été démantelés et raclés pour récupérer les résidus d'argent accumulés précédemment.

Même les bleus de travail des ouvriers ont été passés à l'aspirateur. Des gardes armés vérifient à chaque étape que toutes les ébarbures ont été récupérées. La récupération des résidus d'argent est si efficace que près de 700 tonnes seront recueillies à Carteret et restituées au Trésor en plus de l'argent emprunté. À cela s'ajouteront 1 200 tonnes, récupérées dans l'usine de fabrication des bobines. Le total est bien supérieur à la quantité d'argent empruntée au Trésor qui n'a pu être restituée (cinq tonnes perdues au fil des différentes étapes de transformation des lingots en bobines).

Le périple secret des 400 000 lingots

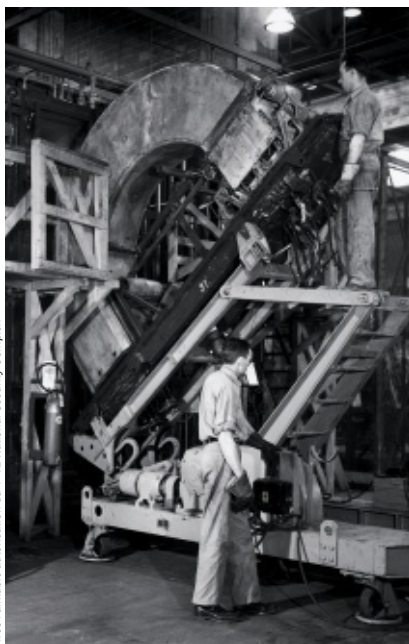
Une fois coulées, les billettes sont acheminées par la route quelques kilomètres plus au Nord, jusqu'à une usine de la *Phelps Dodge Copper Products Company* de Bayway, toujours dans le New Jersey. Là, elles sont chauffées et extrudées en bandes de 8 centimètres de large, 15 millimètres d'épaisseur et 12 à 15 mètres de long. Après refroidissement, les bandes sont laminées à froid pour obtenir différentes épaisseurs selon les spécificités des diverses bobines d'aimants requises, puis façonnées en bobines serrées de la taille de gros pneus de voiture.

4. DES LINGOTS D'ARGENT du Trésor aux aimants de l'usine Y-12, la route était longue : transportés par camions du dépôt de West Point, dans l'État de New York, à une usine du New Jersey, ils étaient fondus en billettes, puis extrudés en bobines dans une usine voisine, avant d'être acheminés par train dans le Wisconsin, où les bobines électromagnétiques destinées au projet Manhattan étaient enfin produites. Ainsi, 940 électroaimants furent construits et transportés en train jusqu'au site Y-12.



Plus de 74 000 bobines sont produites. La plupart sont expédiées dans le Wisconsin pour la fabrication des aimants, mais quelque 120 tonnes sont envoyées directement à Oak Ridge pour être façonnées sur le site en près de 9 000 « barres omnibus » – des barres conductrices qui alimentent les solénoïdes en courant. Durant leur manufacture, des gardes armés, munis de morceaux de papier, rattrapent la poussière d'argent produite lors de l'usinage des pièces pour qu'il soit refondu et réutilisé.

Les bandes de bobine sont acheminées par rail du New Jersey au Wisconsin, par chargements de six wagons scellés et gardés 24 heures sur 24. À la *Allis-Chalmers Manufacturing Company* de Milwaukee, les bobines sont déroulées et assemblées avec des soudures à l'argent pour former des bobines plus longues, puis enfin enroulées autour des corps de bobine en acier des boîtiers d'aimants. Entre février 1943 et août 1944, 940 aimants sont enroulés. Chacun contient en moyenne environ 13 tonnes d'argent. Ces aimants sont alors acheminés jusqu'à Oak Ridge dans des wagons plats.



6. UN OUVRIER retire une enceinte d'un calutron du site Y-12 afin d'en extraire l'uranium. Les ouvriers devaient racler les parois des enceintes pour récupérer l'uranium qui n'avait pas atteint les collecteurs d'ions.

Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

La première piste de course *Alpha* entre en service le 13 novembre 1943, mais son exploitation initiale est de courte durée : les bobinages entrent en court-circuit parce qu'ils sont trop serrés et que de la matière organique a contaminé une huile isolante. L'exploitation est suspendue, et 80 aimants *Alpha-I* sont renvoyés à Milwaukee pour qu'ils soient réusinés. La deuxième piste *Alpha* entre en service le 22 janvier 1944, et la première est reconstruite le 3 mars. Fin janvier 1945, neuf pistes de course *Alpha* contenant 864 calutrons et six pistes *Bêta* contenant 216 calutrons fonctionnent dans huit gros bâtiments du complexe Y-12.

De la bombe *Little Boy* à... la médecine

L'isotope 235 s'accumule peu à peu à Oak Ridge. En avril 1945, les installations Y-12 n'ont produit que 25 kilogrammes d'uranium de qualité militaire et, toutes méthodes d'enrichissement confondues (d'autres méthodes ont été développées sur d'autres sites), les quantités augmentent d'environ 200 grammes par jour. À la mi-juillet, les installations ont produit un peu plus de 50 kilogrammes. À ce stade, Y-12 a consommé environ 1,6 milliard de kilowattheures d'électricité, soit à peu près 100 fois l'énergie libérée par *Little Boy*, la bombe larguée sur Hiroshima le 6 août 1945. Presque chaque atome d'uranium 235 entrant dans la confection de *Little Boy* provient des calutrons de Lawrence. Fin 1946, la production cumulée de Y-12 s'élève à un peu plus de 1 000 kilogrammes d'uranium 235, l'équivalent d'environ 15 bombes d'Hiroshima.

Fin 1946, la méthode de séparation de l'uranium par diffusion gazeuse obtient un bien meilleur rendement que le processus électromagnétique, si bien que l'enrichissement de l'uranium est arrêté en décembre dans tous les bâtiments de Y-12, sauf un. Mais c'est seulement le 1^{er} juin 1970 que le dernier lingot d'argent du projet Manhattan est restitué à West Point, quelques semaines avant la mort de Groves : certains calutrons de Y-12 sont restés en service, utilisés pour d'autres éléments du tableau périodique.



© Ed Westcott / Avec l'aimable autorisation de l'AMSE, Oak Ridge

5. LE GOUVERNEMENT AMÉRICAIN avait embauché de jeunes bachelières pour faire fonctionner les calutrons sur le site Y-12. Les jeunes femmes étaient formées à surveiller les compteurs et à régler les cadrans, mais on ne leur avait pas dit ce que produisaient les calutrons.



Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

7. LE SITE SECRET CLINTON ENGINEER WORKS, dans l'Est du Tennessee, où fut construit le complexe électromagnétique Y-12. Fin 1945, plus de 1 100 calutrons étaient en service sur le site.



Avec l'aimable autorisation de la Milwaukee County Historical Society

8. À LA ALLIS-CHALMERS MANUFACTURING COMPANY, dans le Wisconsin, les bobines d'argent étaient déroulées, soudées, puis enroulées autour des corps de bobine en acier des boîtiers d'aimants.

Après la guerre, de nombreux calutrons sont rééquipés avec des bobinages en cuivre, mais pas les calutrons de l'usine pilote. Ceux-là fonctionnent jusqu'en 1974 (avec 60 tonnes d'argent dans les bobinages de leurs aimants autres que ceux de l'uranium, dont certains sont utilisés dans le réacteur à graphite du tout proche Laboratoire national d'Oak Ridge. L'installation crée des marqueurs radioactifs pour certains examens médicaux. D'autres calutrons développés pour le projet Manhattan séparent des isotopes stables jusqu'en 1998 ; ensuite, l'arrivée de sources meilleur marché d'isotopes impose la fin de l'exploitation. La fermeture de ces installations est une des raisons de l'actuelle pénurie d'isotopes médicaux aux États-Unis.

Les deux visages du projet Manhattan

Aujourd'hui, les installations Y-12 d'Oak Ridge sont toujours en service en tant que Complexe de la sécurité nationale du ministère de l'Énergie, sous contrat avec la *Babcock & Wilcox Company*. Elles ont été récemment reconverties en site de récupération et de stockage de matériaux nucléaires. Un rapport datant de 2010 de la *Nuclear Posture Review*, qui définit la stratégie nucléaire américaine pour les prochaines années,

prône également la construction d'une nouvelle installation de traitement de l'uranium sur le site Y-12, qui pourrait être opérationnelle en 2021.

Souhaitons qu'Oak Ridge, de même que les deux autres sites du projet Manhattan – Los Alamos, au Nouveau-Mexique, et Hanford, dans l'État de Washington – restent accessibles pour aider les générations futures à explorer et comprendre le projet. Los Alamos centralisait les recherches scientifiques du projet, et Hanford mettait en œuvre une autre stratégie pour obtenir un matériau fissile : la synthèse, dans des réacteurs géants, de plutonium à partir d'uranium.

Les historiens débattront sans fin pour savoir si le projet Manhattan a vraiment contribué à abréger la Seconde Guerre mondiale ou permis d'éviter une invasion sanglante du Japon. Le fait d'accélérer la fin de la guerre valait-il le coût en victimes civiles et les dégâts en termes d'image et d'autorité morale de l'Amérique ? Quoi qu'il en soit, le projet Manhattan a été la plus grande entreprise mondiale de « Big Science ». Il a influencé des événements à court et à long terme comme aucune autre initiative scientifique de l'histoire. Le projet et son programme *Silver* sont des modèles de ce que la science et l'ingénierie, conduites par des professionnels compétents, peuvent accomplir quand le besoin se fait pressant. ■

L'AUTEUR



Cameron REED est professeur de physique au *Alma College* à Alma dans le Michigan, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Reed, *The Physics of the Manhattan Project*, Springer, 2010.

C. Reed, *Bullion to B-Fields: the Silver Program of the Manhattan Project*, *Michigan Academician*, vol. 39, n° 3, pp. 205-212, 2009.

Le site Web du Complexe de sécurité nationale Y-12 propose de nombreuses archives : www.y12.doe.gov

LOGIQUE & CALCUL

La culturomique

L'étonnant corpus de textes créé récemment par une équipe internationale de chercheurs dévoile des phénomènes linguistiques insoupçonnés.

Jean-Paul DELAHAYE



De nombreuses informations, concernant le monde physique, culturel ou social sont trop coûteuses à collecter : il n'est pas envisageable par exemple de savoir combien de personnes connaissent le nom de Kurt Gödel et le sujet de ses recherches. Alors que pour évaluer le nombre de personnes qui connaissent une personnalité très en vue, nous pouvons opérer par sondage, pour une personnalité scientifique à la notoriété moindre, il faudrait, pour un résultat fiable, un échantillon de plusieurs dizaines de milliers de personnes... ce qui revient trop cher. On a pallié aujourd'hui ce problème en utilisant un énorme corpus de données comportant cinq millions de livres !

Sonder ou tout prendre en compte ?

Les sondages donnent accès à des informations globales sur de grands ensembles impossibles à explorer de manière exhaustive : groupes humains, populations animales, objets sortant d'une chaîne de production, etc. Malheureusement, les sondages ne voient pas les faibles fréquences.

Pour des statistiques fines, il nous faut procéder autrement et nous savons que les élections sont le seul moyen pour mesurer l'importance des petits partis. Sans les approches exhaustives ou presque exhaustives, de nombreux faits restent invisibles ou impossibles à mesurer. L'infor-

matique élargit le champ des variables évaluables : elle offre des capacités de stockage massif d'informations, elle réalise des collectes de faits, de chiffres et d'images à grande échelle et les automatise. Elle donne aussi des moyens de traitement numériques ultrarapides pour l'exploration des gigantesques bases de données. Plusieurs domaines de recherche sont nés ou ont été renouvelés. Ainsi, la fouille de données (*data mining*) conçoit des méthodes pour extraire l'information pertinente des masses inouïes de données enregistrées sur les supports numériques et la technologie des moteurs de recherche sur Internet se fonde sur des bases d'informations stockées sur les disques durs de centaines de milliers d'ordinateurs des *datacenters*, information mise à jour en permanence, puis manipulée instantanément pour répondre aux milliards de requêtes des utilisateurs que nous sommes tous.

De nombreuses disciplines scientifiques (toutes ?) sont concernées. Citons la météorologie où les réseaux de collectes d'information et les outils de calcul sont perfectionnés sans relâche ; la géographie et la démographie, qui disposent de tableaux chiffrés de plus en plus variés et nombreux ; l'économie, elle aussi soumise à une multiplication des informations mises à sa disposition ; la biologie et la génétique, avec ces centres de données de séquences qui sont devenus un outil quotidien des chercheurs ; les mathématiques avec, par exemple, la base de suites numériques de Neil Sloane.

La linguistique utilise depuis longtemps les outils informatiques. La constitution de corpus de textes donne une vision objective des langues parlées ou écrites. La réunion de tous les textes d'un auteur permet l'étude statistique du vocabulaire d'un écrivain et de ses habitudes stylistiques.

Les conclusions sont parfois étonnantes : Dominique Labbé, après analyse des œuvres de Molière et de Corneille, prétend que les 16 œuvres principales de Molière ont été écrites par Corneille, thèse qui, sans faire l'unanimité, s'appuie sur des arguments sérieux.

Cinq millions de livres

Un pas vient d'être franchi dans la taille des corpus linguistiques auquel la science informatique donne accès : une base de 5 195 769 livres a été constituée.

Ces livres, qui proviennent des bibliothèques de 40 universités, ont été numérisés par la Société *Google* ; ils représentent quatre pour cent de la totalité des livres jamais publiés. Les ouvrages ont été sélectionnés parmi 12 millions de livres numérisés en prenant en compte la qualité de la numérisation et des informations générales, les « métadonnées », dont on dispose sur eux. Le corpus ainsi constitué comporte 500 milliards de mots. C'est énorme : en lisant un livre chaque jour pendant 50 ans, vous n'en aurez parcouru que 18 000, soit 0,36 pour cent du corpus constitué. Les textes mis bout à bout, à raison de dix symboles par centimètre,