

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

ДВУХСОТЛЕТИЕ МЕМУАРА 1773 г.  
ШАРЛЯ ОГЮСТЕНА КУЛОНА

Проф. Ж. Керизель. Париж, Франция

BICENTENAIRE DE L'ESSAI DE 1773  
CHARLES AUGUSTIN COULOMB

J.Kerisel – Professeur Honoraire. Paris, France

BICENTENARY OF THE 1773 PAPER  
OF CHARLES AUGUSTIN COULOMB

J.Kerisel, Prof. Emeritus, Paris, France.





**АННОТАЦИЯ:** Шарль Огюстен Кулон больше известен своими трудами по магнетизму и электричеству, тогда как он значительную часть своей жизни посвятил гражданскому строительству, в частности – механике грунтов. Высокообразованный, он систематически обращается к опыту, чтобы совершенствовать строительное искусство. Он рассматривает фундаментальные проблемы. Плодотворность его творчества объясняется в равной мере как ходом его мыслей, так и его характером, его настойчивостью и объективностью – несмотря на потрясения государственного строя, сопровождавшие французскую революцию.

Уважаемые господин Председатель,  
дамы и господа,

Я глубоко тронут оказанной мне сегодня честью воскресить перед Вами в памяти образ Шарля Огюстена Кулона по случаю двухсотлетия его мемуара 1773 г. "О приложении правил максимумов и минимумов к некоторым проблемам статики, относящимся к архитектуре (1)". /7/

Особо благодарю за это профессора И.А. Ганичева, председателя Оргкомитета, профессора Н.А. Цытовича, председателя советской Ассоциации по механике грунтов, а также профессора Г.Г. Мейергофа, который два года назад предложил профессору Цытовичу тему этого доклада.

Личность Кулона показалась мне привлекательной по трем причинам:

– во-первых, потому что он является воплощением переходного периода, когда ученые проявляли себя одновременно и как математики и как физики, а он, по-видимому,

является одним из первых таких ученых который заинтересовался строительным искусством и, в частности, влиянием грунтов на сооружения:

– во-вторых, если в области физики он больше известен за свои работы по электричеству, то его вмешательство в строительное дело было, в его жизни, первостепенным, и я рад олучаю, который предоставлен нашему Международному обществу по механике грунтов, чтобы исправить эту оценку историков:

– и, наконец, потому что – хотя его жизненный путь и прошел через эпоху королевской власти, революцию и империю – изменения государственного строя не нарушили ни ясности его суждений, ни его плодовитости.

Удивительно, что после надгробного слова, принесенного Делабром /11/ в 1807 г. в Академии наук, ни один биограф в течении 160 лет, не интересовался его жизнью, до тех пор пока, раз за разом, в 1968 г. и 1971 г. не были опубликованы две большие работы: диссертация на 500 страницах Чарльза Стюарта Джильмора /14/, представленная на историческом факультете Принстонского университета, а затем книга профессора Кембриджского университета в Великобритании Джэка Хеймана /15/ "Мемуар Кулона о вопросах статики". (Этим двум авторам я многим обязан.)

---

(1) Этот мемуар был зачитан автором перед Академией наук в Париже, 10 марта и 2 апреля 1773 г.

Мое намерение - рассказать Вам о том кем был Кулон, какова была его жизнь инженера и каков был ход его мыслей.

\* \* \*

Отец его был инспектором королевского имущества; волею судеб Кулон родился в 1736 г. в гор. Ангулем, вдали от колыбели Кулонов, которые искони были юристами в гор. Монпелье, прославленном своим университетом. Мать Кулона была женщиной властной, отец - человеком, придерживающимся традиций, слабохарактерным. Вскоре семья переезжает жить в Париж, где молодой Шарль Огюстен начинает свое обучение, а, затем, уже юношей, имеет возможность слушать лекции по математике, читаемые Шарлем Ле Мунье в Королевском Коллеж де Франс. Вскоре он заявляет о своем намерении стать математиком, но получает категорический отпор со стороны матери, которая прочит его во врачам. Отец, разоренный неудачными спекуляциями, возвращается в родной гор. Монпелье, тогда как мать, довольно состоятельная, угрожает Шарлю Огюстену лишить его наследства, если он ей не повинуется. Но хоть и без денег, Шарль Огюстен решается на послушание и уезжает к отцу в Монпелье. Как видите, господа, конфликт поколений - старое явление.

Это решение повлияло на его обучение, т.к. королевское научное общество гор. Монпелье гордилось тем, что в 1706 г. оно было признано вторым королевским научным обществом Франции. Кулон стал членом этого общества в возрасте 21 года, после того как представил работу по геометрии о среднепропорциональных кривых  $1/\sqrt{x}$ . За 16 месяцев он представил в это научное общество четыре других мемуара: один - по механике, и три - по астрономии. Но надо было позаботиться и о карьере, которая могла бы разрешить и материальные затруднения, и предоставить какой-то досуг для продолжения научных исследований. Он тогда решает поступить в Корпус инженерных войск и получить благословение отца, в 1758 г., в 22-летнем возрасте, он отправляется в Париж, чтобы предоставиться к вступительным экзаменам.

Мне сперва хотелось бы окунуться о Вами в атмосферу предреволюционной эпохи Франции, эпохи философов - просветителей, верящих в будущее науки. Дидеро издает семнадцатитомную энциклопедию, официально запрещенную. Он в ней выражает мысль о том, что человеческий разум больше не должен стремиться к метафизике и религии, а - к науке и истории. Сорок лет до этого Ньютон доказал, что многие кажущиеся независимыми явления могут подчиняться одному единственному закону; Дидеро же думает, что если бы удалось,

благодаря научному методу, все социальные явления свести к одному закону - столь же общему, как закон всемирного тяготения - то все бы люди оказались на пути создания научно организованного общества, непременно ведущего, по мнению Дидеро, к этому высшему благу, каким является счастье.

Этот огромный научный оптимизм вызывает теперь улыбку, но он наверно повлиял и на Кулона. Да это к тому же эпоха, когда в Англии Джеймс Уатт своей паровой машиной подает сигнал началу промышленного переворота.

Но дух консерватизма продолжает жить во всех учреждениях, и в частности в учебных заведениях; Королевская школа военных инженеров гор. Мезьер, прославившаяся на всю Европу, открыта в принципе для всех одаренных молодых людей, но, практически, прием молодого человека, который не может сослаться на свое дворянское происхождение, остается на самом деле довольно исключительным; так в 1760 г., незадолго до поступления Кулона, группа молодых дворян обращает на себя внимание директора школы, затеяв серьезно прочувствовать новичков, не способных сослаться на свое благородное происхождение.

При поступлении Кулона аббат Камю - единственный экзаменатор. Он экзаменует только по математике; надо думать, что отстранить этого совсем много адъюнкта Научного общества гор. Монпелье, без дворянской родословной, - ему трудно, т.к. в декабре 1760г. Шарль Огюстен поступает в школу Мезьер.

Командант военного училища, Шастийон-офицер, придающий очень большое значение традициям. В школе - две направленности: одна - правительственная - нацелена на воспитание унтер-офицеров в узком смысле слова, другая - бытовая в среде профессуры - нацелена на воспитание людей о большими научными познаниями. Шастийон мало ценит назначение - по рекомендации д'Аламбер - на кафедру математики, аббата Боссю, лекции которого, выходя за пределы математики, касаются также и физики. Курс аббата Боссю оразу привлекает внимание Кулона, который несколько пренебрегает рутинными занятиями в училище, за что он удостоивается довольно строгой оценки команданта: "хорошее поведение, прилично рисует, но работа его об осаде - ниже посредственного" /3/.

По окончании училища Кулон назначает-ся в гор. Брест, где бы ему пришлось в течение двух лет заниматься морским картированием, если бы непредвиденные обстоятельства совершенно не изменили его карьеру.

В те времена короли мечтали о неприступных укреплениях: Людовик XV, после

неудачной Семилетней войны, решил построить на малых Антильских островах, на острове Мартиника, мощную крепость. Стоимость проекта достигала суммы в 6 миллионов фунтов, что соответствует, в пересчете на современные доллары 12-18 миллионам, если я не ошибся.

Только успел Кулон занять свою должность в гор. Бресте, как, вследствие болезни нескольких офицеров старших по возрасту, его назначают сестя на судно "Ле Бриан", которое отчаливает к острову Мартиника в феврале 1764 года. В 27 лет ему предстоит испытать счастье быть, по сути дела, главным инженером грандиозного проекта строительства крепости Бурбон(1) над рейдом Фор де Франс, в горах Мон-Гарнье. В крепости были запроектированы подпорные стенки толщиной в 24 фута, т.е. 7,78м, паразеты, госпиталь, водоем, пороховой погреб и продовольственные склады. Вот план этой крепости (рис. 1); размеры ее - 600 туаз, т.е. около 1166 м, по периметру, и 200 туаз (389 м) по наибольшей ширине (в сторону рейда).

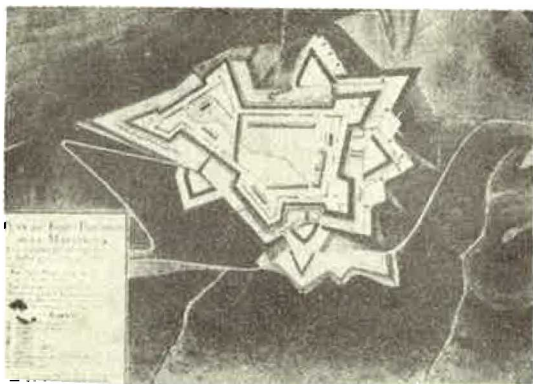


Рис. 1. Проект крепости Бурбон.

Незадолго до прибытия Кулона на остров, два военных инженера умерли, другие офицеры, служащие под начальством автора проекта, больны. Проект, из-за его стоимости сильно критикуется губернатором, но Кулон подчеркивает все его достоинства и, в конце концов, ему поручают его выполнение. Между тем болезнь

косит рабочую силу, которой недостает и по количеству и по качеству. Директор Рошефор заболевает, его заместитель сходит с ума. Кулон пробудет здесь 8 лет.

Кулону были поручены работы камнерезные, земляные, выемка скальных пород, каменная кладка, планировка сводов, подпорных стен и т.д. Здесь он и начинает свою исследовательскую работу, которая будет опубликована в 1773 г., а также и другие исследования, которые он публикует в 1778, 1779 и 1780 гг., - в которых он зарекомендует себя как один из предшественников тэйлоризма и стахановских методов - исследования, озаглавленные:

"Результаты нескольких опытов, предназначенных для определения количества работы, которую человек может ежедневно совершать, в зависимости от того, как он использует свои силы". /10/.

Позже он пишет следующее:

"Мне часто приходилось испытывать насколько все теории, основанные на гипотезах (дословно так) или на опытах, проведенных в физическом кабинете, являются недостаточными для практики; я занимался всеми исследованиями, которые могли найти применение в работах, которые поручаются военным инженерам".

Может быть Кулон имел с собой трактат Белидора /4/, /5/, который тогда уже был сорокалетней давности, и о всех недостатках которого он высказывался впоследствии. Но, практически - он был лишен всякой документации. Нашей системы Geodex retrieval и наших Реферативных журналов, типа Geotechnical abstracts, тогда еще не было.

Зная сколь скудны были возможности Кулона, представляя враждебность окружающей его природы вулканического острова, подверженного землетрясениям, точимого малярией и дизентерией - невольно вспоминаешь о герое французского писателя Поль Валери(2), архитекторе Евпалиносе.

"Он молодецки принялся за эту ужасную смесь сухого с промозглым, твердого с вялым, света с мраком, - за эту смесь, беспорядок которой пронизывал самые мельчайшие частицы

(1) Теперь крепость Дезекс.

(2) Валери П. - Евпалинос или архитектор. Oeuvres. Dialogues T II. P. 79 à 148 - La Pléiade N.R.F.

Он распутал это смутно излучающее мессиво, в котором не было ни единой чистой частички, и в которой были разведены все энергии!.."

Как Евпалинос, каждое утро он давал своим рабочим одни только "приказы, да числа" - результаты его размышлений во время жарких Караибских ночей.

Но организм его - не в силах выдержать такую напряженную умственную деятельность, и Кулон серьезно заболевает сперва в 1767 г., а потом и в 1770 г.

В 1772г. строительство крепости в основном закончено и Кулон наконец получает разрешение вернуться во Францию.

В течение 9 лет он будет вести кочующий образ жизни офицера инженерных войск.

Будучи в гарнизоне в гор. Бушэн, он пишет мемуар 1773 года, который мы сегодня цествуем; эта работа откроет ему в 1774 г. двери Академии наук, куда он избирается членом - корреспондентом аббата Боссю, действительного члена Академии. Находясь в Шербурге с 1774 г. по 1777 г., он решает принять участие в конкурсе на получение премии, предлагаемой Академией наук за лучший способ приготовления магнитных компасов; тогда и намечается новая направленность его научных работ по теории электричества и магнетизма. Но он отнюдь не забрасывает гражданское строительство, поскольку, будучи в 1777 г. назначенным в гор. Безансон он участвует в другом конкурсе, объявленном научным обществом гор. Руан на тему "подводного усечения скалы, мешающей навигации на р. Сене, около порта Кийбэф". К этой работе мы вернемся позже /8/.

Два года спустя его назначают в гор. Рошефор; там он строит крепость на болотах, окружающих город; но стапеля судостроительных верфей и связанный с ними вопрос трения древесины по древесине привлекают его внимание; свои опыты по трению он будет продолжать и развивать и удостоится за это новой академической премии /9/.

Как видите, он всюду пользуется своим местом пребывания, чтобы выйти из круга рутинных работ, возлагаемых на офицеров. Впоследствии он пишет, что "прилежному молодому человеку, выпускнику Училища, ничего не остается иного делать, чтобы вынести скуку и однообразие своих занятий, как только отдался какой-либо отрасли науки или литературы, совершенно чуждой его положению".

Его исследование по трению будет его последней работой по гражданскому строительству. Затем карьера его будет карьерой физика, а потом - крупного чиновника.

Избранный в Академию наук в 1781 г., он поселяется в Париже. В те времена по волепросам крупных проектов король обращался за консультацией в Академию и на долю Кулона выпало докладывать Академии по более чем 300 делам или проектам, из которых пятьдесят относились к гражданскому строительству. От себя лично он представит в Академию двадцать пять новых исследований и мемуаров, в основном по магнетизму и по электричеству.

В 1783 г. его репутация инженера упрочняется и министр морского флота назначает его докладчиком по одному проекту, который поставил правительство в затруднительное положение. Речь идет о предложении, сделанном парламентом Бретани - судебно-политическим учреждением этой провинции - создать систему каналов, соединяющих города Анже, Нант, Ренн, Лаваль и Сен-Мало (рис. 2), а также построить очень большой порт-крепость в гор. Сен-Мало.

В XVIII веке развитие каналов имело действительно определенное значение не только в связи с началом индустриализации, но также из-за морского владычества Англии, способной блокировать каботажное плавание.

В течение нескольких месяцев Кулон на месте изучает проект. В архивах Бретани/2/ я нашел, от руки самого Кулона, зарисовку инженерно-геологического разреза; на ней Кулон дает уровень материковой породы, которую называет очень твердой живой скалой, и отмечает на различных расстояниях - от 1 до 15 тудз (т.е. через промежутки примерно от 2 до 30 м), толщину покрывающего грунта (рис. 3). Он определенно высказывается о возможном способе сдачи подрядов с торгов: "есть неудобства, - пишет он, - отдавать с торгов огулом по столько-то за шлюз потому что, если в смете было какое-то предложение, которое из-за местных условий, при производстве работ надо изменить, - подрядчику надо возместить убыток, и надо, чтобы инженер признался в том, что он не все предвидел. А, поскольку на такой случай будет вестись точная ведомость его ошибок, он будет опасаться о них сообщать и это будет в ущерб сооружению".

По проекту - строительство порта Сен-Мало оценивалось в 30 миллионов фунтов



Рис 2. Проект бретонских каналов, по поводу которого запрашивается мнение Кулона.

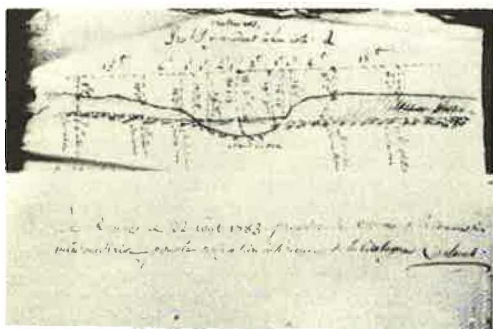


Рис 3. Инженерно-геологический разрез одного бретонского канала; зарисовка от руки Кулона с его подписью.

(50–75 миллионов долларов), из которых больше трети приходилось на работы по драгированию. Кулон подписывает доклад – благоприятный, при условии некоторых изменений, для канала Редон–Ренн, но – очень неблагоприятный для порта Сен-Мало, из-за несоответствия между огромными расходами и малой пользой.

Обескураженный бесплодными спорами, но – без увольнительного билета, он возвращается в Париж, где отдается своим научным работам в Академии; штаты Бретани заявляют протест против высказанного непреклонным Кулоном мнения и против его преждевременного отъезда. Осужденный военным министром при пересмотре дела, Кулон подает заявление об отставке, но получает отказ, а к тому же еще и приговор к 8 суткам тюремного заключения за прогул.

Между тем, после начала строительства, проекты бретонских каналов долго еще будут оставаться мечтой и штаты Бретани, два года спустя, признав честность и бескорыстность Кулона, преподносят ему золотые часы

с выгравированным на них гербом Бретани. Когда он будет хронометрировать колебания своих крутильных весов, часы будут напоминать ему уважение, которого он в конце концов удостоился благодаря стойкости своего характера.

В 1784 г. он назначен Интендантом королевского водного хозяйства и фонтанов и в связи с этим занимается гидравлическими машинами.

Вспыхивает Революция: до наступления Террора, она мало что изменит в научных занятиях Академии. Но в июле 1793 г. Академия вынуждена закрыться. Лавуазье и Кондорсе всходят на эшафот. Кулон же переселяется в окрестности гор. Блуа, где в течение трех лет он изучает циркуляцию сока в деревьях. Он тогда, вероятно, усвоил мысль немецкого поэта Хельдерлина: "Was wir sind is nichts, was wir suchen ist alles" (То что мы суть - ничто, то что мы ищем - все) (1).

Затем его призывают вновь и назначают членом Института Франции, заменившего Академию.

\* \*  
\*

Во второй части моего доклада я хочу теперь ознакомить вас с тремя мемуарами Кулона:

- с его мемуаром 1773 года,
- с исследованием по трению,
- и, наконец, с мемуаром о производстве гидравлических работ.

#### Мемуар 1773 г.

В секретариате конгресса вы найдете преиздание этого мемуара. Его английский перевод напечатан в книге профессора Хеймана, на которую я уже ссыдался "Мемуар Кулона о вопросах статики".

Это исследование - попытка дать ответ на пять вопросов, поставленных в Париже еще в 1717 г. неким Готье /13/ по поводу строительства мостов, под заголовком "Пять вопросов, предлагаемых ученым для решения".

1. Толщина опор под любого рода мост.
2. Размеры устоев в зависимости от пролетов.
3. Толщина сводов вблизи замков.
4. Форма арок.
5. Размеры подпорных стенок.

(1) Гиперион - отрывок, напечатанный в журнале *Thalia de Schiller* в 1794 г.

В мемуаре разбираются вопросы прочности кладки опор, активного давления грунтов и расчета сводов.

Прежде всего, разрешите несколько пояснить само заглавие "Мемуар о приложении правил максимумов и минимумов (*maximis et minimis*) к некоторым проблемам статики, относящимся к архитектуре".

Слово архитектура - обычно для того времени, т.к. деятельность архитектора еще не отличалась от деятельности инженера. Что же значит выражение "*maximis et minimis*", употребляемое Кулоном? Отметим сперва, что до Кулона латынь часто употребляется. Эйлер /12/ пишет свой первый трактат о потере устойчивости (1744) по латыни. Под выражением "*maximis et minimis*" понимается - метод вариации между двумя крайними значениями, который теперь считается классическим в теории пластичности; напомним его дословное описание в случае активного и пассивного давлений грунтов.

"Предположим, - пишет Кулон (1), - что имеем твердый прямоугольный треугольник с одним вертикальным катетом и гипотенузой, касающейся наклонной плоскости, по которой треугольник склонен скользить; если, при воздействии силы тяжести, треугольник поддерживается горизонтальной силой, своим сцеплением и трением, которые действуют вдоль гипотенузы - легко определить, в случае равновесия, эту горизонтальную силу, исходя из принципов статики. Заметим кроме того, что грунты, если принять их однородными, могут при разрушении отделиться не только по прямой линии, но и по любой кривой; из этого следует, что для нахождения давления, оказываемого любой грунтовой поверхностью на вертикальную плоскость, следует отыскать - среди всех описанных в вертикальной бесконечной плоскости поверхностей - ту, которая при воздействии силы тяжести, будучи задержанной связностью и трением, потребовала бы для равновесия подпоры горизонтальной силы максимального значения ибо, в таком случае, - поскольку любая другая фигура требует меньшего значения горизонтальной силы при равновесии, - ясно, что примыкающая масса не может отделиться. Поскольку опыт показывает, что линия разлома грунтов, - когда они сдвигают с места покрытие, - почти прямая, для практики достаточно найти, в неопределенной поверхности, среди всех треугольников, дающих на вертикальную плоскость тот, который требует, чтобы был задержанным наибольшей горизонтальной силой".

Рассматриваемая плоскость скольжения обозначена на рис. 4 через  $Va$ , тогда как

(1) Стр. 15 мемуара.

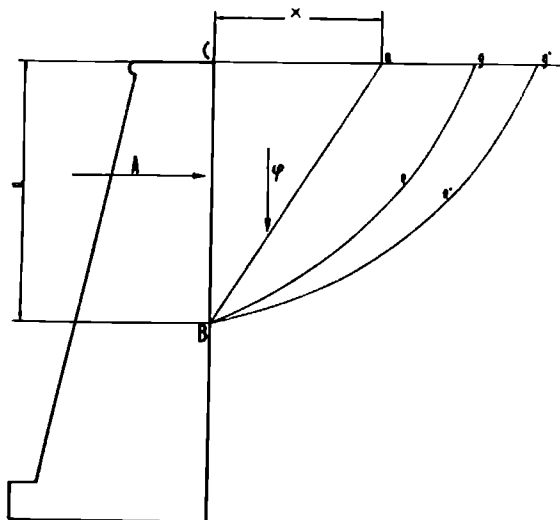


Рис. 4. Иллюстрирующий рассуждения Кулона о максимумах и минимумах для определения активного и пассивного давлений.

СВ = а и Са = х; вес призмы, склонной к сползанию, равен  $\varphi = \gamma \frac{a^2 x}{2}$ , где  $\gamma$  обозначает удельный вес. Эта призма подпирается силой А, которая предполагается горизонтальной, равной, но противодействующей активному давлению грунтов, благодаря действию  $\delta(a^2 + x^2)^{1/2}$  - того, что Кулон называет связностью  $\delta$  - вдоль гипотенузы и, наконец, благодаря трению вдоль той же линии, равному нормальным составляющим  $\varphi$  и А, помноженным на самое трение, обозначаемое Кулоном через  $\frac{1}{n}$ . Таким образом, Кулон дает выражение А в зависимости от х. Найдя значение х, которому соответствует максимум А, он получает выражение:

$$x = -\frac{a}{n} + a \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}}$$

Если вернуться к современным обозначениям, положив  $\lambda_n = \tan \varphi$ , действительно находим выражение

$$\frac{x}{a} = \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Соответствующее значение активного давления, выводимое Кулоном, равно (1)  $A = m a^2 - \delta l a$ , где m и l зависят только от  $\pi$  и их легко отождествить с привычными нам тригонометрическими выражениями:

$$m = \frac{\gamma}{2} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{и} \quad l = 2 \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Точно также Кулон считает, что для определения наибольшей силы, могущей действовать не нарушая состояние покоя - следовало бы найти другую кривую Вe'g', которой бы соответствовало новое, минимальное значение силы А, достаточное, чтобы вызвать оползание поверхности СВ e'g' вдоль Вe'g' (рис. 4).

Но Кулон здесь осторожен: он не говорит, что пассивное давление может быть определено предположив, что Вe'g' - прямая линия в грунтовых массивах. Хотя немного далее он и дает результат, который соответствует такой гипотезе.

(1) Однако далее он дает результат, соответствующий прямой линии.

Чтобы определить максимальное усилие, которое может выдержать опора из каменной кладки, Кулон по аналогии прибегает к рассуждению по минимуму для пассивного давления, применяя его к прямолинейной плоскости раскола, что, по его мнению, соответствует наблюдению. Пренебрегая весом каменной колонны квадратного сечения со стороной  $a$  (смотреть рис. 5), который подобен рис. 4, повернутому на  $90^\circ$ , он находит (1), что  $\alpha$  угол наклона плоскости раскола  $CM$  к горизонтали, определяется уравнением:

$$P \sin \alpha = \frac{\delta a^2}{\cos \alpha} + \frac{P \cos \alpha}{n}$$

в котором  $P$  имеет минимальное значение. Обозначив  $\frac{1}{n}$  через  $\operatorname{tg} \varphi$  находим, что  $\alpha$  действительно равен  $\operatorname{arctg} \left( \frac{P}{a} + \varphi \right)$ .

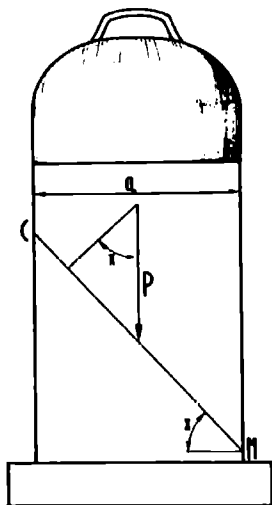


fig. 5

Рис. 5. Разрушение каменной колонны по линии  $CM$  под действием осевой силы  $P$ .

Точно также Кулон применяет эти правила максимумов и минимумов для расчета сечений излома сводов.

Вернемся к выражению активного давления грунтов по Кулону:

$$A = ma^2 - \delta la$$

Кулон (1) из этого делает два основных вывода.

1/ Во-первых, что можно рыть канавы "разрезая грунты по вертикальной плоскости, без обрушения" до глубины  $a$ , получаемой подстановкой значения  $A = 0$ , что дает  $a = \delta l/n$  или, в современном обозначении:

$$a = \frac{4C}{\gamma} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

2/ Во-вторых, при заданной глубине выемки, по аналогичному принципу, находят угол, под которым следует срезать грунты, чтобы они "поддерживались собственной связностью".

Далее, Кулон обобщает свою формулу на случай дополнительной нагрузки и на случай шероховатой облицовки, когда, пишет он: "...грунты преодолевают сопротивление, чтобы течь вдоль каменной кладки". Наконец, в заключение своей работы, он делает несколько замечаний, которые носят отпечаток строителя, если не физика.

1/ Свежевыработанные грунты обладают нулевой связностью (2)

2/ Трение грунта вдоль кладки - меньше, чем его внутреннее трение (3).

3/ Часто, - пишет Кулон, - воды, фильтрующиеся сквозь грунт, околпятся между грунтом и кладкой, и образуют водоносный слой, так что активное давление грунта заменяется давлением жидкости без трения.

Не является ли это высказывание первым шагом в направлении наших методов нулевого трения? -

В численных примерах, предлагаемых Кулоном дважды рассматривается случай, когда  $\varphi = 45^\circ$  и  $c = 0$ .

Но вы, конечно, вполне законно, спросите меня, где же тут значения величин сцепления и трения грунтов, замеренные Кулоном.

(1) Стр. 12 мемуара.

(1) Стр. 20-21 мемуара.

(2) Стр. 22 мемуара.

(3) Стр. 23 мемуара.

По правде говоря, результатов измерения сцепления грунтов мы не находим. Само сочетание сцепления с трением, вероятно, результат рассуждений по аналогии, которые относятся ко всем материалам: от растворов, кирпичей и камней, вплоть до металлов, не исключая и древесину.

Испытания на растяжение растворов проводились на острове Мартиника<sup>(1)</sup>.

Кулон поясняет, как он измерял сцепление камня. Он брал (рис. 6) плитку *abcd*, из каменной породы района Бордо (сечением в один квадратный фут), с желобообразной выточкой. К нижней части выточки, на канатах, подвешивалась загрузочная площадка. Груз *P* на площадке давал значение прочности при растяжении. Затем, в опытах на сдвиг, представленных на рис. 7 (контур *ADeg* заложен в паз), Кулон получает новое значение прочности, очень мало превышающее предыдущее; это общее значение рассматривается им как равное величине сцепления.

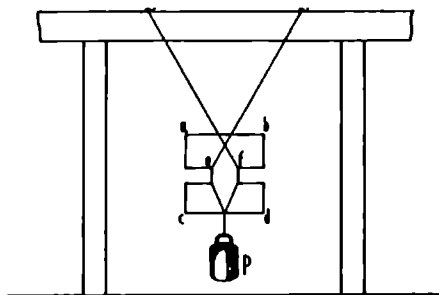


fig. 6

Рис. 6. Опыты Кулона по определению прочности при растяжении каменных пород.

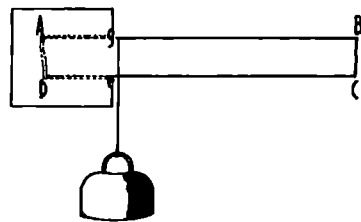


fig. 7

Рис. 7. Опыты Кулона по определению сопротивления камня срезу.

В случае грунтов он, вероятно, не располагал достаточно точной аппаратурой для измерения сцепления *C*, и только 70 лет спустя Александр Коллэн /6/ даст нам впервые по настоящему замеренные значения величины сцепления грунтов в недренированных условиях (рис. 8). Но вопросом действительной природы трения и сцепления во всех телах Кулон будет увлекаться всю свою жизнь, не только в работе 1773 г. и не только в работе по трению 1777 г., о которой теперь будет идти речь. На примере этого исследования мы сможем убедиться насколько рассуждения по аналогии могут быть близки к истине.

#### Мемуар 1777 г. по трению /9/.

В эпиграфе к этой работе, очень длинной, всецело экспериментальной, Кулон, чтобы подчеркнуть сложность явлений, которые он исследует, приводит слова французского писателя Монтэнь<sup>(1)</sup>:

"Рассуждения столь многообразны, что мы не знаем которым пользоваться: опыт же - разнообразен не менее".

Кулон сперва предостерегает читателя от опытов, проводимых в физическом кабинете в уменьшенном масштабе:

(1) Стр. 7 мемуара.

(1) Оценки (*Essais*), книга III, гл. 13.

ими нельзя довольствоваться, т.к. малейшая неровность, малейшее препятствие между соприкасающимися поверхностями, связность каких-либо более или менее однородных частей - приводят к очень большому разбросу результатов. Он различает два очень отличных друг от друга случая.

Первый случай - когда оба тела уже некоторое время покоятся одно на другом. По мнению Кулона трение может зависеть от следующих факторов:

- а) от природы находящихся в контакте материалов и смазок,
- б) от величины поверхностей,
- с) от давлений, воспринимаемых этими поверхностями,
- д) от продолжительности контакта,
- е) от влажности воздуха.

Второй случай - когда одно тело скользит по другому с определенной скоростью. Возможные факторы - первые три, плюс величина скорости. Изложенные здесь опыты относятся к древесине и металлу.

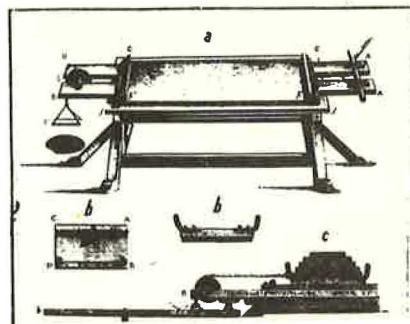


Рис. 9. Экспериментальная установка Кулона для измерения трения по дереву.

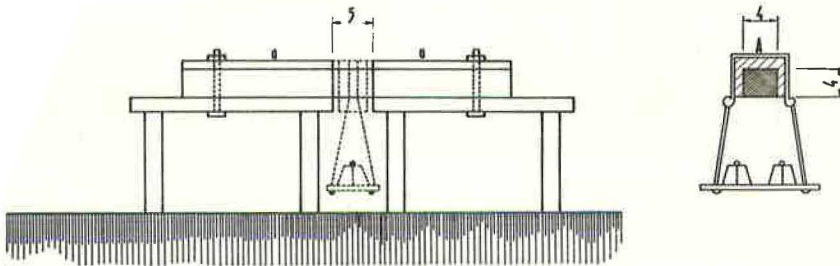


fig. 8

Рис. 8. Прибор Александра Коллэн для испытаний на сдвиг образцов размером 4 x 4 см.

На рис. 9 представлена экспериментальная установка Кулона, состоящая в основном из загрузочных салазок (b) (к которым привязан передающий тягу канат, перекинутый через блок), трущихся о поверхность деревянного стола (a). Салазки устанавливаются на место при помощи ворота, изображенного слева. Благодаря выточкам, выдолбленным в полосте, меняется площадь контакта.

Чтобы преодолеть большое исходное трение, использовано устройство безмена (c) на рисунке.

В опытах, относящихся к упомянутому выше второму случаю, ведро с грузом, подвешенное к канату, приводит салазки в равномерно ускоренное движение, по которому определяется постоянное значение трения.

В первом случае Кулон находит, что между двумя прижатыми друг к другу изделиями из древесины - в течение нескольких секунд трение быстро растет, потом этот рост значительно замедляется; Кулон предлагает для роста следующее выражение зависимости от времени t :

$$f = f_0 \frac{1 + \alpha t^\mu}{1 + \beta t^\mu}$$

f возрастает от значения  $f_0$  до  $f_0 \frac{\alpha}{\beta}$  при  $\alpha > \beta$ , показатель степени  $\mu$  примерно равен 1/5, если t выражено в секундах.

Во втором случае Кулон находит, что трение после выдержки - значительно больше трения движущихся поверхностей, и, в случае вяза, дает отношение 9,5 к 2,2. Однако в случае металлов оба значения равны, причем трение f зависит от неровностей, и Кулон выявляет наличие очень небольшого сцепления.

Кулон приводит множество опытных данных, на основании которых он делает в отношении трения следующие обобщенные выводы.

Волокна, которыми покрыта поверхность древесины, сцепляются на подобие щетинок двух щеток (рис 10, a).

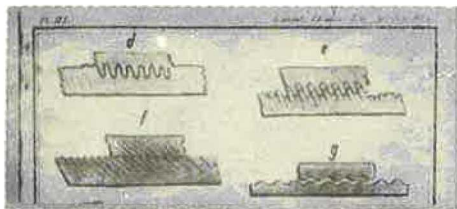


Рис. 10. Интерпретация Кулона явления дилатации при трении дерева по дереву.

Если к верхней доске приложить сдвигающее усилие, волокна обеих поверхностей будут взаимно сгибаться (e), пока не соприкоснутся (боковой поверхностью), не расцепляясь (f). В таком положении взаимосоприкасающиеся волокна больше согнуться не могут, и угол их наклона зависит от толщины волокон. Это верно, каково бы ни было давление. Таким образом, при любом давлении, для того чтобы волокна, скользящие под таким наклоном, могли расцепиться - потребуется сила пропорциональная давлению.

После достаточного проскальзывания изделий, волокна расцепляются и принимают наклон больший предыдущего, но одинаковый, какое бы ни было давление, кроме случая очень небольших поверхностей, когда - поскольку площади контакта наименьшие - внутренние части поверхностей поддаются огромным, прилагаемым давлениям.

В металлах же нет ни волокон, ни гибких частей (g); положение ямок остается неизменным при любых обстоятельствах.

Не правда ли, что в исследовании Кулоном трения дерева по дереву можно найти не мало аналогий с явлениями, которые нас теперь занимают как, например: дилатация, упрочнение в состоянии покоя и рост прочности со временем (то, что наш покойный коллега Бьеррум называл "time-hardening"), уменьшение величины трения до остаточного значения при продолжающемся относительном перемещении, и масштабный фактор.

#### Мемуар 1777 г. по производству подводных работ /8/

Рисунок 11 - фотокопия заглавного листа первого издания этого мемуара - воспроизведение одного из редких имеющих оригиналов. Кулон несколько раз перерабатывал этот текст; вышедшее несколькими изданиями исследование остается его бестселлером, и это благодаря революционному характеру предложенного устройства: кессона с сжатым воздухом.

В то время пользовались водолазным колоколом на одного человека, но колокол часто опрокидывался; к тому же водолаз работал в необновляемой атмосфере, объем которой уменьшался по мере опускания на большую глубину.

Для срезания скалы, мешающей навигации на р. Сене, около порта Кийбеф, Кулон предлагает кессон (рис. 12) с двумя боковыми отсеками А и В, высотой в 9 футов и 6 дюймов (3,08м), с полом, образующим понтоны, лежащие на дне; эти отсеки примыкают к центральному отсеку С с открытым дном, высотой в 11 футов (3,56м). В потолке этого отсека: - люк диаметром в 20 дюймов (0,54м) для спуска рабочих, с толстым стеклом, пропускающим дневной свет, - отверстие для нагнетания сжатого воздуха мехами, с клапаном и противовесом

под потолком и, наконец, — регулируемый выпускной кран для испорченного воздуха.

Чтобы уменьшить утечку воздуха, стенки центрального отсека покрыты свинцом, а снизу, на скале, заделаны глиной. Рабочие собирают отбитую породу в ковш, который виден справа от С (на рис. 3 первой вкладки); при каждом приливе кессон поднимается, буксируется, сажается на мель и очищается от отбитой породы.

При первом издании мемуара Лавуазье предложил Кулону внести некоторые изменения в расчет расхода нагнетаемого, сжатого воздуха.

Далее, для работ на больших глубинах чем в Кийбеф, Кулон предлагает более мощный кессон с многочисленными воздушными насосами. На рисунке 13 изображена, в вертикальном разрезе и в горизонтальной плоскости, половина усовершенствованного предложенного им судна. Буквами а b d обозначена свинцовая труба для подачи воздуха в рабочую камеру. Воздух сжимается у носа судна в поршневом корпусе, питаемом четырьмя гидронасосами.

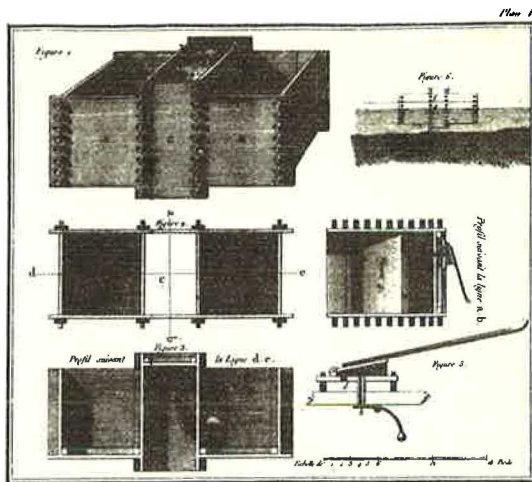


Рис. 12. Приложение к мемуару Кулона о производстве подводных работ — вкладка 1.

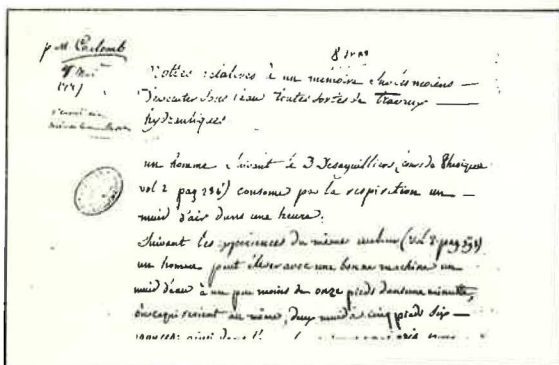


Рис. 11. Начало подлинной рукописи Кулона о производстве подводных работ.

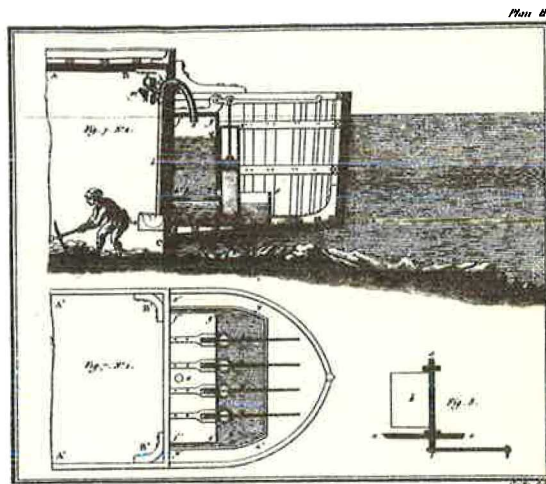


Рис. 13. Приложение к мемуару Кулона о производстве подводных работ — вкладка 2.

Для большего удобства работы этого кессона Кулон<sup>(1)</sup> предлагает устроить в верхней части рабочей камеры "один или два небольших отделения размером в четыре - пять футов во всех направлениях, покрытых, как и камера, свинцовым листом: эти отделения соединены двумя дверями с одной стороны с компрессивной камерой, а с другой - с наружным воздухом". Это и есть принцип воздушно-го шлюза.

Вот, господа основные моменты творчества Кулона в области гражданского строительства и, в особенности, механики грунтов.

\*  
\* \* \*

В 1802 г. Кулон представляет в Академию последний мемуар по магнетизму. Ему 66 лет. Наполеон назначил его генеральным инспектором народного просвещения. Но его здоровье все время ухудшается из-за напряженной работы и припадков малярии. Он живет на левом берегу Сены; в скромной квартирке на набережной Кз де ла Моне, недалеко от института Франции, он проводит свои последние опыты по электричеству, уединяясь в комнате, выходящей во двор, потому что, - объясняет он, - там ему спокойней и вибрации экипажей, проезжающих по набережной не сотрясают его крутильные весы.

О чем думает он на закате жизни? Удивительна была его судьба: он хотел стать математиком; наполявину обездоленный матью, прочившей его во врача, он стал инженером, потом физиком. Хоть и родился он при королевской власти, когда только потомственные дворяне имели доступ в высшие школы, но - благодаря своим рано пробудившимся способностям - он сумел все же попасть в самую лучшую из них. Великий дух свободы, навеянный французской Революцией, вызывает в нем большие надежды. Но в excessах Революции погибает его друг Лавуазье. Когда все успокаивается, он борется за свободный доступ всех талантов к любому поприщу. Мечтая о свободе, он умирает в 1806 г., в возрасте 70 лет, вскоре после коронавания императора.

Мог ли он предугадать поразительное развитие использования достижений науки в промышленности? Подозревал ли он сколькими индексами украсится его символ сцепления С? Предполагал ли он, что будут построены земляные плотины 300-метровой высоты? Обо всех тех, кто отличился новшеством идеи говорят, что зародыш их открытия зиял в их первой работе. На пороге смерти он, может быть,

вспоминает захватывающий труд инженера под солнцем Малых Антильских островов, и в памяти его, возможно, всплывают увлекательные исследования по механике грунтов и сопротивлению материалов.

Крепость Бурбон не поддается воздействию времени (рис. 14), но она оказалась построенной зря. От скалы порта Кийбеф не осталось и следа. Но, не все ли равно? Ведь созданное - ценно не само по себе, а тем - что оно побуждает других продолжать начатое дело.

Отметим с удовлетворением, что эта механика грунтов, за развитие которой он не так известен, была, тем не менее, славным достижением его молодости; он ею занимался непрерывно и она открыла ему путь к другим творческим работам.

Его жизнь, можно сказать - яркий пример того, что научные знания необходимы для творческой работы инженера и физика и что последний должен обладать за одно и интуицией, позволяющей ему выделять из опыта основные параметры, и - даром наблюдения действительности.

Как, кажется, сказал Ленин, один из Ваших выдающихся соотечественников, господин председатель: факты - упрямая вещь, а истина - всегда конкретна.

В день открытия конгресса небезинтересно было вспомнить творческое наследие Кулона. Я буду рад, уважаемые дамы и господа, если я сумел правильно его понять и передать вам самое ценное из этого наследия.

\* \* \*

ЛИТЕРАТУРА: См. Французский текст доклада.

\* \* \*

(Русский перевод Г.В. Сидорова.  
Париж, май 1973 г.)



Рис. 14. Руины крепости Бурбон.

(1) Стр. 29 второго издания, 1797 г.



Monsieur le Président,  
Mesdames, Messieurs,

Je ressens profondément l'honneur qui m'est fait aujourd'hui d'évoquer devant vous la mémoire de Charles Augustin COULOMB à l'occasion du bicentenaire de son essai de 1773 :

" Essai sur une application de règles de Maximis et Minimis à quelques problèmes de Statique relatifs à l'Architecture" [7]

La personnalité de COULOMB m'a paru attachante à trois titres :

- d'abord, il incarne l'esprit d'une période de transition où se manifestent les savants qui sont à la fois des mathématiciens et des physiciens et il est, semble-t-il, l'un des premiers savants de ce genre qui s'intéresse à l'art de construire, et en particulier aux actions des sols sur les édifices ;

- si, dans le domaine de la physique, il est plus connu pour ses travaux sur l'électricité, en fait, son intervention dans le génie civil a été prioritaire dans sa vie, et je suis heureux de cette occasion qui est donnée à notre Société Internationale de Mécanique des Sols de rectifier cette appréciation des historiens ;

- enfin, sa vie traverse la Royauté, la Révolution et l'Empire, mais, ni la sérénité de son jugement, ni la fécondité de son oeuvre n'ont été altérées par les changements de régime.

Mon propos, ici, est de vous dire qui fut COULOMB, ce que fut sa vie d'ingénieur et quelle fut la démarche de son esprit.

(1) Le texte intégral en anglais, français et russe est disponible au Secrétariat du Comité d'Organisation.

Par un hasard de la carrière de son Père, Inspecteur des Domaines du Roi, il est né à Angoulême en 1736, loin du berceau des COULOMB, traditionnellement juristes à Montpellier, ville dont l'université était réputée. Sa mère était autoritaire, son père homme de tradition sans grand caractère. Très rapidement, la famille vient s'installer à Paris ; le jeune Charles Augustin y fait ses premières études, puis annonce son intention de devenir mathématicien ; mais il se heurte à l'opposition totale de sa mère qui le veut médecin. Son père, ruiné par des spéculations malheureuses, retourne dans son Montpellier natal, tandis que sa mère, assez fortunée, menace de déshériter Charles Augustin s'il ne se plie pas à sa volonté. Mais, sans le sou, Charles Augustin décide de passer outre, et rejoint son père à Montpellier. Ce n'est pas d'aujourd'hui, vous le voyez, que datent les conflits de générations.

Cette décision va influencer ses études, car la Société Royale des Sciences de Montpellier se flattait d'avoir été reconnue en 1706 comme la deuxième Société Royale Scientifique de France. COULOMB y est admis à l'âge de 21 ans, après y avoir présenté un essai géométrique sur les courbes moyennes proportionnelles. [1]

MEZIERES, l'école royale militaire du génie, de renommée européenne, est, en principe, ouverte à tous les talents. Mais, en pratique, l'admission d'un jeune homme, qui ne peut faire état de "quartiers de noblesse", reste en fait assez exceptionnelle, et, en 1760, peu de temps avant l'entrée de COULOMB, un groupe de jeunes nobles se signale à l'attention du Directeur de l'Ecole, en entreprenant de corriger sévèrement des nouveaux admis dans l'impossibilité d'exciper qu'ils sont bien nés.

L'Abbé CAMUS est examinateur unique à l'entrée. Son examen porte uniquement sur les mathématiques : il faut croire qu'il lui est difficile d'écarter ce très jeune membre adjoint de la Société des Sciences de Montpellier, sans quartiers de noblesse, puisque Charles Augustin rentre en Décembre 1760 à MEZIERES.

Il délaisse quelque peu les travaux de routine de l'école, ce qui lui vaudra l'appréciation assez sévère du gouverneur : "Bonne conduite, exécutée proprement le dessin, mais son mémoire sur le siège est au-dessous du médiocre" [3]

C'était le temps où les rois rêvaient de remparts inexpugnables : Louis XV avait décidé, après la malheureuse guerre de Sept Ans, de construire un puissant fort aux Caraïbes, dans l'île de la Martinique. Le projet s'élevait à la somme de 6 millions de livres, soit, autant que ma correspondance soit exacte, 12 à 18 millions de dollars actuels.

La maladie de plusieurs officiers plus âgés que COULOMB fait que, à peine en poste à Brest, il est désigné pour La Martinique. A 27 ans, il va connaître l'aventure exaltante d'être pratiquement maître d'oeuvre d'un immense projet, celui du fort BOURBON à construire dans la montagne sur le Mont GARNIER, au-dessus de la rade de FORT de FRANCE. Il comportait des murs de soutènement de 24 pieds, soit 7,78 m, des parapets, un hôpital, une citerne, un magasin à poudre et des entrepôts à vivres. Voici (Fig. 1) un plan de ce fort : son périmètre était de 600 toises, soit 1.166 m environ ; sa plus grande largeur (vers la rade) était de 200 toises (389 m)

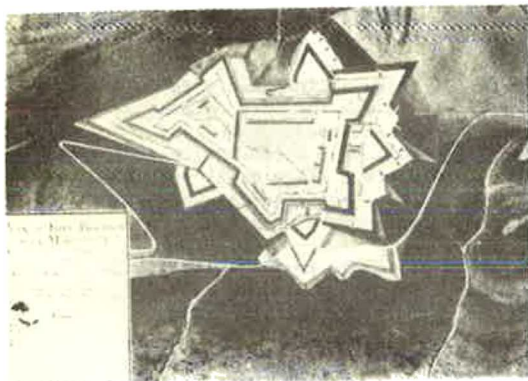


Fig. 1 - Projet du Fort BOURBON

COULOMB était chargé de la coupe des pierres, des terrassements, du déroctage, des travaux de maçonnerie, du dessin des voûtes, des murs de soutènement, etc... C'est là que s'élabore son essai de 1773.

[4] Peut-être a-t-il emporté le Traité de BELIDOR [5] qui date déjà de quarante ans et dont il en dira plus tard toutes les insuffisances. Mais il est pratiquement sans documentation. Notre GEODEX RETRIEVAL SYSTEM et nos GEOTECHNICAL ABSTRACTS n'existent pas encore !

COULOMB tombe sérieusement malade en 1767, puis en 1770. En 1772, le fort est en grande partie achevé et il est enfin accordé à COULOMB de revenir en France.

Pendant 9 ans, sa vie sera celle d'un officier du génie nomade.

En garnison à BOUCHAIN, il écrit l'essai de 1773 que nous commémorons : il lui entrouvrira en 1774 les portes de l'Académie des Sciences puisqu'il y est nommé correspondant de l'Abbé BOSSUT, Académicien en titre. A Cherbourg, de 1774 à 1777, il décide de concourir au prix offert par l'Académie concernant la meilleure manière de fabriquer des compas magnétiques ; c'est alors que se dessine une bifurcation dans ses travaux scientifiques vers la théorie de l'électricité et du magnétisme.

Deux ans plus tard il est nommé à Rochefort ; il construit un fort sur les marais qui entourent la ville ; mais les cales de lancement des chantiers de constructions navales et, à travers elles, le frottement bois sur bois attirent son attention, et il va continuer et développer ses expériences sur le frottement qui lui vaudront en 1781 un nouveau prix à l'Académie [9]

Partout, on le voit, il tire avantage de sa résidence pour sortir des travaux de routine imposés aux officiers. Il écrira plus tard : "Un jeune sujet studieux qui sort de l'Ecole n'a d'autre parti à prendre, pour supporter l'ennui et la monotonie de ses occupations, que de se livrer à quelque branche de science ou de littérature absolument étrangère à son état".

Elu à l'Académie en 1781, il va résider à Paris. L'Académie des Sciences est alors consultée par le Roi sur les grands projets.

En 1783, sa réputation d'ingénieur s'affirme et le Ministre de la Marine le désigne comme rapporteur d'un projet qui embarrasse le gouvernement. Il s'agit d'une proposition formulée par le Parlement de Bretagne sur la création d'un système de canaux.

COULOMB examine sur place le projet pendant plusieurs mois. J'ai retrouvé dans les archives de Bretagne [2] un profil géotechnique de la main de COULOMB où il situe le profil du rocher qu'il qualifie de roc vif très dur, au-dessous du sol naturel et où il a relevé les épaisseurs de la couverture de sol suivant des intervalles variables de 1 à 15 toises (2 à 30 m environ) (fig. 2)

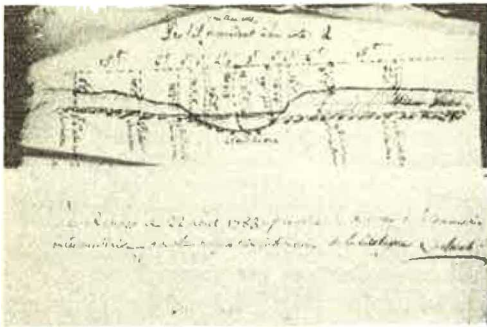


Fig. 2 - Profil géotechnique d'un canal breton tracé de la main de COULOMB avec la signature de COULOMB

La Révolution survient : jusqu'à la Terreur elle ne changera pas grand chose aux habitudes studieuses de l'Académie. Mais, en Juillet 1793, elle doit fermer ses portes : LAVOISIER et CONDORCET montent sur l'échafaud et COULOMB s'exile près de BLOIS où, pendant 3 ans il étudiera la circulation de la sève dans les arbres. Il a sans doute fait sienne la pensée de HÖLDERLIN :

"Was wir sind is nichts, was wir suchen ist alles" (1)

Puis il est rappelé et nommé Membre de l'Institut qui a remplacé l'Académie.

-o-

Dans cette deuxième partie de ma conférence, je voudrais maintenant examiner, avec vous, deux des mémoires de COULOMB :

- l'essai de 1773
- celui sur le frottement

- L'ESSAI de 1773 [7]

Vous trouverez au secrétariat du congrès une réimpression de ce mémoire. Sa traduction en anglais figure dans le livre du Pr J. HEYMAN publié en 1972: "COULOMB's memoir on statics" [15]

Je voudrais d'abord vous donner quelques explications sur le titre "Essai sur une application des règles de MAXIMIS et MINIMIS à quelques problèmes de Statique relatifs à l'Architecture".

Le mot Architecture est usuel pour l'époque car les fonctions d'architecte et d'ingénieur étaient encore généralement confondues. Les expressions Maximis et Minimis désignent une méthode de

variation entre deux extrêmes, aujourd'hui classique en plasticité et dont nous allons rappeler l'expression littérale pour la poussée et la butée des terres :

Le plan de glissement considéré est Ba (Fig. 3) avec  $CB = a$  et  $Ca = x$ ; le poids  $\frac{a}{2} \varphi$  du prisme qui tend à glisser est  $\varphi = g \frac{a}{2} x$ ,  $g$  : poids spécifique. Il est retenu par la force A supposée horizontale, égale et opposée à la poussée des terres, par l'action  $\delta (a^2 + x^2)^{1/2}$  de ce qu'il appelle la cohérence  $\delta$  sur l'hypoténuse et enfin par le frottement sur celle-ci, égal aux composantes normales de  $\varphi$  et de A multipliées par le frottement qu'il désigne par  $\frac{1}{n}$ . COULOMB donne ainsi l'expression de A en fonction de x. Il cherche la valeur de x qui rend A maximum, et arrive ainsi à :

$$x = \frac{-a}{n} + a \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}}$$

Si nous revenons à nos notations d'aujourd'hui, en posant  $\frac{1}{n} = \text{tg } \varphi$ , on retrouve bien notre expression  $\frac{x}{a} = \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$ .

La valeur correspondante de la poussée qu'en déduit COULOMB est  $A = ma^2 - \delta \ell a$ , m et  $\ell$  fonctions de n seulement, qu'il est facile d'identifier avec nos expressions trigonométriques usuelles :

$$m = \frac{g}{2} \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \text{ et } \ell = 2 \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

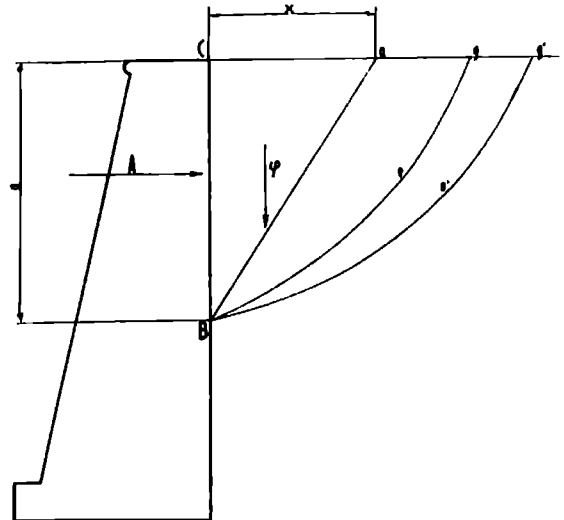


Fig. 3 - Illustrant les raisonnements à maximis et minimis de COULOMB pour la détermination de la poussée et de la butée

(1) Nous ne sommes rien, c'est ce que nous cherchons qui est tout (HYPERION - Fragment paru dans la revue THALIA de SCHILLER en 1794)

COULOMB en tire deux conséquences essentielles :

1°) D'abord, que l'on peut creuser un fossé "en coupant les terres suivant un plan vertical, sans qu'elles s'écroulent" jusqu'à la profondeur  $a$  calculée en faisant  $A = 0$ , soit  $a = \frac{\delta l}{m}$ , qui dans notre écriture moderne donne :

$$a = \frac{4 C}{\gamma} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

2°) Si la hauteur de l'excavation est donnée, on trouve par des principes analogues l'angle sous lequel il faudrait couper les terres pour qu'elles se "soutiennent par leur propre cohésion"

Puis, COULOMB généralise sa formule au cas d'une surcharge, et à celui d'un parement rugueux, lorsque, écrit-il, "les terres font effort pour couler sur la maçonnerie". Enfin, il termine par quelques remarques qui portent la marque d'un constructeur, sinon d'un physicien

- 1°) la cohérence des terres fraîchement remuées est nulle
- 2°) le frottement des terres contre la maçonnerie n'est pas aussi fort que celui des terres sur elles-mêmes
- 3°) souvent, écrit COULOMB, les eaux filtrant à travers les terres se rassemblent entre les terres et la maçonnerie et forment des nappes d'eau qui substituent la pression d'un fluide sans frottement à la pression des terres.

Cette remarque n'est-elle pas un premier pas vers nos méthodes  $\varphi = 0$  ?

Dans les exemples numériques qu'ils présentent pour les sols, COULOMB prend deux fois le cas  $\varphi = 45^\circ$  et  $C = 0$ .

Mais où sont, me demanderez-vous très légitimement, les mesures de COULOMB sur les valeurs de la cohésion et du frottement dans les terres ?

A vrai dire, on ne trouve pas de mesure de cohésion des terres. L'existence même de la dualité cohésion-frottement résulte probablement d'un raisonnement analogique qui embrasse tous les corps depuis les mortiers, les briques, les pierres jusqu'aux métaux en passant par les bois.

Les expériences de traction sur mortiers ont été faites à La Martinique ; il indique comment il a mesuré la cohésion des pierres ; pour les sols, il n'a probablement pas pu disposer d'un appareillage suffisamment précis pour mesurer  $C$  et il faudra attendre 70 ans Alexandre COLLIN [6] pour avoir quelques premières véritables mesures de cohésion non drainée. Mais la question de la véritable nature du frottement et de la cohésion dans tous les corps passionnera COULOMB toute sa vie au-delà de l'essai de 1773 et de l'essai sur le frottement de 1777.

Nous allons voir dans cet essai combien le raisonnement par analogie peut s'approcher de la vérité.

- L'ESSAI de 1777 sur le frottement [9]

COULOMB met d'abord en garde le lecteur contre les essais en petit dans un Cabinet de Physique : ils ne peuvent suffire parce que la moindre inégalité, le moindre obstacle placé entre les surfaces en contact, la cohérence de quelques parties plus ou moins homogènes, jettent la plus grande irrégularité dans les résultats. Et il distingue deux cas très différents :

1er cas : Les corps sont posés l'un sur l'autre depuis un certain temps. Le frottement, selon lui peut dépendre des facteurs suivants :

- a) la nature des matières en contact et des enduits
- b) l'étendue des surfaces
- c) les pressions que ces surfaces éprouvent
- d) le temps qui s'est écoulé depuis que ces surfaces sont en contact
- e) l'humidité de l'atmosphère.

2ème cas : Les corps glissent l'un sur l'autre avec une certaine vitesse. Les paramètres possibles sont a) b) c) et la grandeur de la vitesse. Les expériences relatées ici se rapportent au bois et au métal.

La figure 4 représente le dispositif expérimental de COULOMB : essentiellement un traîneau (b) plus ou moins chargé (tiré par une corde s'enroulant sur une poulie) et frottant sur une table en bois (a). Le traîneau est ramené en place par le treuil à gauche. En évitant par des gorges la surface inférieure du traîneau, on fait varier la surface en contact.

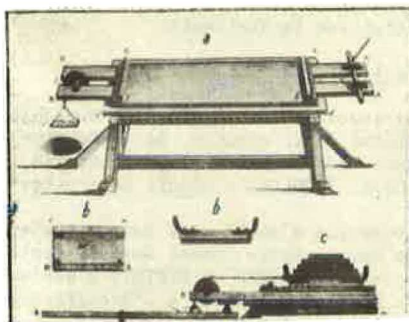


Fig. 4 - Dispositif expérimental de COULOMB pour la mesure du frottement du bois

COULOMB, dans le 1er cas, trouve qu'entre les 2 pièces de bois au contact et pressées l'une sur l'autre, le frottement croît rapidement pendant quelques secondes, puis beaucoup plus lentement, et il donne une loi de croissance en fonction du temps  $t$  :

Dans le deuxième cas, il trouve que le frottement après repos est bien supérieur au frottement des surfaces en mouvement et dans le cas de l'orme dans la proportion de 9,5 pour 2,2

COULOMB donne une quantité de résultats expérimentaux, et, à travers eux, il arrive aux conclusions générales suivantes sur le frottement.

Les fibres dont la surface du bois est couverte entrent les unes dans les autres, comme pourraient le faire les crins de deux brosses (fig. 5) - (d). Si on exerce un effort pour faire

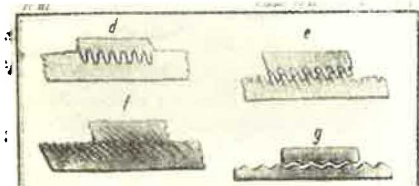


Fig 5 - Interprétation de COULOMB sur la dilatace dans le frottement bois sur bois

glisser la planche supérieure, les fibres des deux surfaces se plient mutuellement (e) jusqu'à ce qu'elles se touchent (latéralement) sans se désengrener(f). Lorsque les pièces ont glissé en grand, les fibres se sont désengrenées.

On trouve dans l'analyse de COULOMB du frottement des bois, bien des analogies avec les phénomènes qui nous occupent : la dilatace, le durcissement au repos et sa croissance avec le temps (ce que notre regretté collègue BJERRUM appelait *time-hardening*), la dégradation du frottement vers une valeur résiduelle lorsque le mouvement relatif se poursuit et l'effet d'échelle.

Vous trouverez au Secrétariat, dans le texte complet de ma conférence, des détails sur ces deux essais et celui concernant les travaux sous l'eau, qui fut son best-seller.

- o -

En 1802, COULOMB présente un dernier mémoire sur le magnétisme à l'Académie. Il a 66 ans. Napoléon l'a nommé Inspecteur Général de l'Instruction Publique. Mais sa santé est de plus en plus altérée par le travail et les fièvres. Il habite

sur la rive gauche, Quai de la Monnaie, près de l'Institut ; dans son appartement modeste, il fait ses dernières expériences sur l'électricité et il s'est réfugié dans une pièce sur cour parce que, dit-il, il y est plus tranquille et que les vibrations des voitures du quai ne secouent pas sa balance de torsion.

Au soir de sa vie, à quoi pense-t-il ? Quelle étrange destinée a été la sienne : il se voulait mathématicien ; à demi déshérité par une mère qui le voulait médecin, il est devenu Ingénieur, puis Physicien. Né sous la royauté où les seuls privilégiés de la naissance avaient accès aux grandes écoles, il réussit par son intelligence précoce à forcer la porte de la plus brillante d'entre elles. Le grand souffle de liberté de la Révolution lui apporte de grandes espérances. Mais, dans les excès de celle-ci, il voit disparaître son ami LAVOISIER. Le calme revenu, il lutte pour une carrière ouverte à tous les talents. Rêvant de liberté, il mourra à 70 ans, en 1806, peu après le couronnement de l'Empereur.

A-t-il pressenti le développement extraordinaire des applications de la science à l'industrie ? S'est-il douté de combien de suffixes s'ornerait son symbole  $C$  de la cohésion ? A-t-il prévu que l'on construirait des barrages en terre de 300 m ? On a dit de tous ceux qui se sont distingués par des vues nouvelles que le germe de leurs découvertes était dans leur premier ouvrage. Aux portes de la nuit, revoit-il le travail passionnant de sa vie d'ingénieur sous le soleil des Caraïbes et songe-t-il à ses passionnantes recherches sur la mécanique des sols et la résistance des matériaux ?

Le Fort Bourbon défie les épreuves du temps (fig. 6), mais il n'a servi à rien. Qu'importe ! La valeur des oeuvres ne réside pas en elles-mêmes mais bien dans le développement qu'elles suscitent chez les autres.



Fig. 6 - Vestiges du Fort Bourbon

Constatons avec satisfaction que cette mécanique des sols pour laquelle il est moins connu, a été cependant l'oeuvre rayonnante de sa jeunesse, qu'elle n'a cessé de le préoccuper, et qu'elle a ouvert la voie, chez lui, à d'autres activités fécondes.

L'enseignement de sa vie n'est-il pas que la culture scientifique est nécessaire à la fécondité du travail de l'ingénieur et du physicien, et que celui-ci doit posséder à la fois l'intuition qui lui permet de dégager les paramètres principaux de l'expérimentation et les dons d'observation des faits.

C'est LENINE, un de vos éminents compatriotes, Monsieur le Président, qui a dit : "les faits sont têtus : la vérité est toujours concrète". Indifférent en apparence aux événements sociaux, COULOMB en a fait la maxime de sa vie de physicien et d'ingénieur.

A l'ouverture de ce congrès, le message de COULOMB n'est pas sans valeur. Je serais content, Messieurs et Mesdames, d'avoir pu l'interpréter convenablement et vous en livrer l'essentiel.

-o-o-o-

#### REFERENCES

- (1)  
Archives départementales de l'Hérault - Série D - 120 (5) fol. 119
- (2)  
Archives départementales d'Ille et Vilaine - 1783 - Précis des opérations relatives à la navigation intérieure de la Bretagne - Rapport de M. COULOMB et Procès-Verbal des vérifications indiquées entre les rivières de la Mayenne et de la Vilaine.
- (3)  
Archives de la guerre (Vincennes) - 1761 - Génie - Ecole de Mézières X<sup>o</sup>5 "Mézières" 2 et 4 - Décembre 1761.
- (4)  
BELIDOR B.F. (de) - 1729 - La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile à Paris
- (5)  
BELIDOR B.F. (de) 1755 - Dictionnaire portatif de l'ingénieur - PARIS
- (6)  
COLLIN A. - 1846 - Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux, accompagnés de considérations sur quelques principes de la mécanique terrestre. Carillan Coeury - Paris

- (7)  
COULOMB C.A. - 1773 - Essai sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de mathématiques et de physique présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers savants, et lus dans ses Assemblées. Vol. 7, pp. 343-82 (1776), réimprimé dans la Théorie des machines simples, Paris 1809 et 1821.
- (8)  
COULOMB C.A. - 1779 - Recherches sur les moyens d'exécuter sous l'eau toutes sortes de travaux hydrauliques sans employer aucun épuisement - Manuscrit original - Bibl. Ac. Sci. puis 2<sup>e</sup> édition par le citoyen COULOMB (1797) - Du PONT Imprimeur Paris
- (9)  
COULOMB C.A. - 1781 - Théorie des machines simples - Ouvrage couronné par l'Académie Bibl. Ac. Sci. - Savants étrangers TX SE 161 - 332.
- (10)  
COULOMB C.A. - 1799 - Mémoires de l'Institut - Première série II - pp. 340-428.
- (11)  
DELAMBRE J.B. - 1806 - Eloge historique de M. COULOMB. Histoire de la classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut National de France. 7, 206, PARIS.
- (12)  
EULER L. - 1744 - Methodus inveniendi lineas curvas Maximi Minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti. Lausanne and Geneva.
- (13)  
GAUTIER H. - 1717 - Dissertation sur l'épaisseur des culées des ponts... Paris
- (14)  
GILLMOR C.S. - 1968 - Charles Augustin COULOMB : Physics and engineering in eighteenth century France. Dissertation for degree of Ph. D. Princeton University ; University Microfilm n<sup>o</sup> 69-2741.  
- 1971 - COULOMB and the evolution of physics an engineering in eighteenth century France. Princeton University Press
- (15)  
HEYMAN J. - 1972 - COULOMB's memoir on statics - Cambridge at the University Press.

Mr. Chairman,

Ladies and Gentlemen,

I am deeply conscious of the honour you do me in allowing me to recall for you today the memory of Charles Augustin Coulomb, on the occasion of the bicentenary of his paper of 1773: "A note on an application of the principles of maximum and minimum to some statical problems, relevant to architecture" (7).

I find the personality of Coulomb attractive for three reasons:

- Firstly, he represents the spirit of an age of transition during which scientists appeared who were both mathematicians and physicists; he seems to be one of the first of this kind to become interested in the field of civil engineering, and in particular in the influence of soil behaviour on buildings.

- If, in the field of physics, he is better known for his work on electricity, his civil engineering work in fact played a more important role in his life, and I am glad to take this opportunity, given by our International Society for Soil Mechanics, to rectify this imbalance.

- Lastly, his life spans the monarchy, the revolution and the empire; but neither the calmness of his judgement nor the creativity of his work suffered for the turbulence of his time.

My intention here is to introduce you to Coulomb the man, by describing to you his career as an engineer, and something of the working of his mind.

By the chance circumstances of the career of his father, who was an inspector of the king's estates, the place of his birth in 1736 was Angoulême, far from the ancestral home of the Coulombs, who were by tradition lawyers in the university town of Montpellier. His mother was authoritarian, his father a man of strong tradition but little character. The family soon moved

to Paris, where the young Charles Augustin began his education. He very soon announced his intention of becoming a mathematician, but met with the implacable opposition of his mother, who wanted him to train as a doctor. His father, ruined by unsuccessful speculation, returned to his native Montpellier, while his mother, with a sizeable fortune of her own, threatened to disinherit her son if he refused to follow the career she had chosen for him. Nevertheless, Charles Augustin decided to leave and, penniless, rejoined his father at Montpellier. Conflicts between the generations are not new in our day, you see.

This decision was to influence his studies, for the Royal Scientific Society of Montpellier, founded in 1706, was second only to that of Paris. Coulomb was admitted at the age of 21 years, after he had presented a paper on the geometry of mean proportional curves (1).

Mézières, the royal military school of engineering, renowned throughout Europe, was in principle open to all with sufficient ability. But in practice, the admission of a young man not of noble birth was still an exceptional event, and in 1760, shortly before Coulomb's entry to the school, a group of young noblemen came to the attention of the Principal, in attempting to correct severely some newly admitted students of the illusion that their lack of high birth could be ignored.

The entrance examination, which was concerned only with mathematics, was set by the Abbé Camus. It would have been difficult to reject this very young associate member of the Royal Scientific Society of Montpellier, although Charles Augustin lacked any title of nobility when he entered Mézières in December 1760.

Coulomb somewhat neglected the more routine part of his studies, earning the severe judgement of the Principal: "Good conduct, neat execution in drawing; but his essay on siege tactics is less than mediocre" (3).

It was the time when kings dreamed of impregnable fortifications; Louis XV had decided, after the unfortunate Seven Years War, to construct a powerful fort in the Caribbean, on the island of Martinique. The project amounted to six million pounds, which I estimate to correspond to 12 to 18 million dollars today.

Because of the illness of several officers older than Coulomb, he was ordered, soon after his arrival in Brest, to embark for Martinique. At 27 years of age, he was to have the adventure of practically taking sole charge of an immense project; that of Fort Bourbon, to be built on the slopes of Mount Garnier, overlooking the roadstead for Fort-de-France. It involved retaining walls 24 feet (7.78m) high, parapets, a hospital, a water tank, a powder magazine and food stores. Fig.1 shows a plan of this fort. It was 600 toises (about 1,166m) in circumference, and 200 toises (389m) in length, along the shoreline.

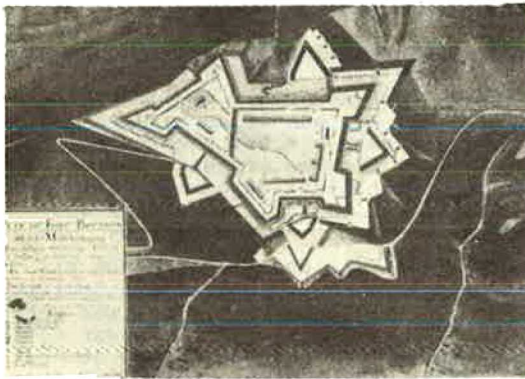


Fig 1 The Fort Bourbon project

Coulomb was in charge of the quarrying of the stone, the earthworks and excavation, the masonry work, the design of the vaults, the retaining walls, etc. It was there that he planned his essay of 1773.

He may have taken with him the textbook of Bélidor (4), (5), which was already 40 years old, and whose inadequacies he later described. But he was practically without documentation. Our Geodex Retrieval System and our Geotechnical Abstracts were not available to him!

Coulomb fell seriously ill in 1767, and again in 1770. In 1772, the fort was largely complete; Coulomb was at last given permission to return to France.

For the next nine years, his life was that of a peripatetic Officer of the Corps of Engineers.

Stationed at Bouchain, he wrote the paper of 1773 which we commemorate today: it gained him admittance to the Academy of

Sciences, since the Abbé Bossut nominated him as his "correspondent". While he was at Cherbourg, from 1774 to 1777, he decided to enter for the prize offered by the Academy for the best method of making magnetic compasses; at that time a division was beginning to set in between the development of scientific theories of electricity and of magnetism.

Two years later, he was sent to Rochefort; he built a fort on the swamp which surrounded the city. But the slipways of the shipyards and the friction of wood against wood on them attracted his attention, and he was to continue and develop his experiments on friction, which won him in 1781 another prize from the Academy (9).

Everywhere we can see how he took advantage of his location to gain variety from the routine of an officer's work. Later, he was to write: "For an intelligent young graduate there is no other way of relieving the tedium and monotony of his work than to devote himself to some branch of science or literature completely different from his occupation".

His election to the Academy, in 1781, confirmed his reputation as an engineer, and the minister of the navy appointed him to report on a project which was troubling the government. It was a proposal put forward by the Parliament of Brittany for the construction of a system of canals.

Coulomb spent several months examining the project on the spot. I have found, in the Departmental archives of Brittany (2), a geotechnical profile drawn by him, in which he shows the depth to bedrock, which he described as very hard solid rock beneath natural soil, and in which he shows that he has surveyed the thickness of this soil cover at intervals of from 1 to 15 toises (about 2 - 30m) (Fig.2).

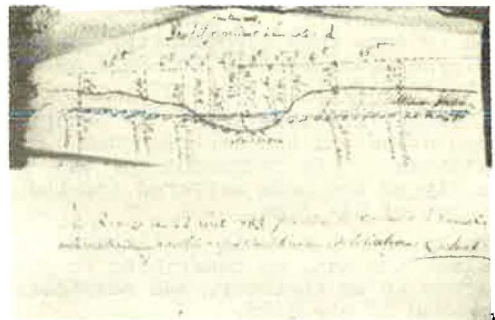


Fig 2 Geotechnical profile of a Breton canal, drawn and signed by Coulomb

The French revolution erupted; until the Terror, it had little effect on the learned activities of the Academy. But in July 1793, the Academy had to close; Lavoisier and Condorcet were led to the scaffold, and Coulomb went to spend three years in exile near Blois, where he studied the movement of sap in trees. He no doubt agreed with Hölderlin that "Was wir sind ist nichts, was wir suchen ist alles"\*.

Then he was recalled and made a member of the Institute, which replaced the Academy.

In this second part of my talk, I would now like to examine with you two of Coulomb's papers:

- the paper of 1773
- his paper on friction.

### The 1773 paper

You can obtain, if you wish, a reprint of this paper from the Secretariat of the Conference. A translation of it into English is included in the book by Professor Heyman, published in 1972 (15). "Coulomb's Memoir on statics". The quotations in what follows are taken from Professor Heyman's translation.

Perhaps I can begin by amplifying Coulomb's title "A note on an application of the rules of maximum and minimum to some statical problems, relevant to architecture".

The word "architecture" was usual for the period, since the functions of architects and engineers were not yet clearly distinguishable. The expression "maximum and minimum" denotes a method of variation between two extremes, which is now fundamental in plasticity, and which was applied by Coulomb to the active and passive thrust of soil.

The plane of sliding considered is Ba in Fig.3, with CB = a and Ca = x; the weight of the prism is  $\phi = \frac{g a x}{2}$ , where g is the density of the soil. The prism is supported by the force A from the wall, which is assumed to act horizontally, equal and opposite to the soil thrust; by the cohesive force  $\delta(a^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}$  (called coherence by Coulomb), due to the cohesion  $\delta$  on the hypotenuse; and by friction on the same plane, equal to the normal components of  $\phi$  and A multiplied by  $1/n$ . Coulomb then gives an expression for A as a function of x; he finds the value of x for which A is a maximum, and thus obtains:

$$x = \frac{-a}{n} + a \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}}$$

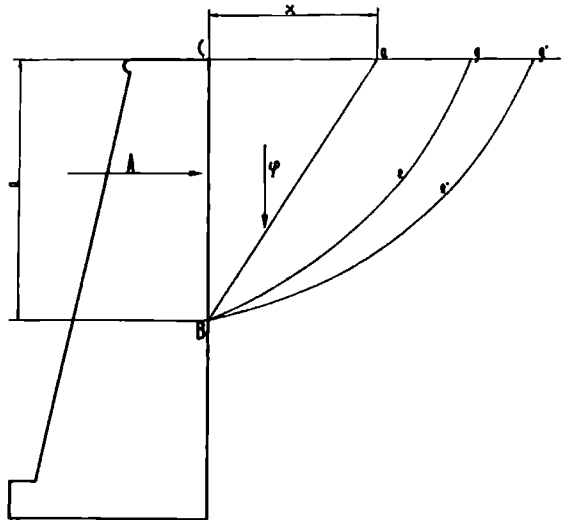


Fig 3 Diagram illustrating the maximum and minimum argument used by Coulomb to determine active and passive thrust

Translating this into our modern notation, by putting  $1/n = \tan \phi$ , we obtain the more familiar expression  $x/a = \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})$ .

Coulomb deduces the corresponding value of the soil thrust as  $A = ma^2 - \delta \ell a$ . m and  $\ell$  are functions of n alone, which can be identified with our usual trigonometric expressions:

$$m = \frac{g}{2} \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}) \quad \text{and} \quad \ell = 2 \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}).$$

Coulomb deduces two important corollaries:

1. Firstly, if "the depth is required to which a trench can be dug, the walls being cut vertically, without them falling in" it can be found by setting  $A = 0$ , so that  $a = \frac{\delta \ell}{m}$ , which in our modern notation gives

$$a = \frac{4c}{\gamma} \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}).$$

2. "By similar principles, if the depth of the excavation were given, the angle could be found at which the soil should be cut so that it would support itself by its own cohesion."

Then, Coulomb generalises his equation to the case of a surcharge, and to a rough

\*"What we are is nothing; what we seek is all." (Hyperion - a fragment published in the review "Thalia" by Schiller in 1794.)

retaining wall, where, as he puts it, "soil attempts to slip over masonry".

Lastly, he concludes with some comments which bear the stamp of an engineer, rather than of a physicist.

1. The cohesion of recently disturbed soils is nil.
2. "Friction of soil against masonry is not so large as internal friction of soil."
3. "Often," he writes, "water, percolating through the soil, collects between the soil and the masonry and forms a layer of water, replacing soil forces by the frictionless pressure of a fluid."

Could not this remark be considered a first step towards our  $\phi = 0$  analysis?

In the numerical examples which he presents for soils, Coulomb twice considers the case where  $\phi = 45^\circ$  and  $c = 0$ . But where, you may justifiably ask, are experimental measurements by Coulomb of the values of cohesion and friction for soils?

In fact Coulomb gives no data on the cohesion of soils. The division of shear strength into cohesive and frictional components may well be based on a comprehensive reasoning intended to include all materials from mortar, bricks and stone, through wood, to metals.

Experiments on the tensile strength of mortar were, however, conducted by Coulomb in Martinique. He also describes how he measured the cohesion of stone; for soils he probably did not have any sufficiently accurate apparatus for the measurement of  $c$ , and it was not until seventy years later that Collin (6) produced the first real measurements of undrained cohesive strength of soil. But the question of the real nature of friction and cohesion in all materials fascinated Coulomb throughout his life, beyond the paper of 1773, and the paper of 1777 on friction. We shall see in this paper how near one can come to the truth by reasoning from analogy.

#### The 1777 paper on friction (9)

Coulomb begins by warning the reader to be sceptical of experiments conducted on a small scale in a scientist's study; they cannot suffice, he says, because the slightest irregularity, the smallest particle between the surfaces in contact, the adherence of some more or less homogeneous parts, induces large errors in the results. He distinguishes two very different cases:

1st case: The bodies have been in contact for some time. The friction between them, according to Coulomb, can depend on the following factors:

- (a) The nature of the materials in contact, and of any surface coatings
- (b) The extent of the area of contact
- (c) The pressure between the surfaces

(d) The time for which they have been in contact

(e) The prevailing atmospheric humidity.

2nd case: The bodies are sliding one upon the other with a certain relative velocity. The possible parameters are (a), (b), (c) and the magnitude of this velocity. The experiments he reported here were conducted on wood and on metal.

Fig.4 shows Coulomb's experimental apparatus. It consists essentially of a sledge (b), bearing a variable load and pulled by a cord passing over a pulley, and sliding on a wooden table (a). The sledge is returned by the winch A. The area of contact can be varied by adjusting the underside of the sledge.

In the first case, Coulomb found that, for two pieces of wood pressed together, the friction increases rapidly in the first few seconds of contact, and then much more slowly. He gives a relation expressing this increase with time.

In the second case, he finds that sliding friction is less than sticking friction after a period of stationary contact; he finds that for elm wood, the ratio between them is 9.5 to 2.2.

Coulomb gives a large amount of experimental data, and from them he draws the following general conclusions on friction.

The fibres covering the surface of wood become enmeshed in one another, like the bristles of two brushes (Fig.5(d)). If a lateral force is imposed on the upper surface, the fibres of the two surfaces bend (e) so as to touch laterally, without disengaging (f). When the surfaces begin to slide on the macroscopic scale, the fibres will become disengaged.

We find in Coulomb's analysis of the friction of wood some close analogies with the phenomena which concern us today:

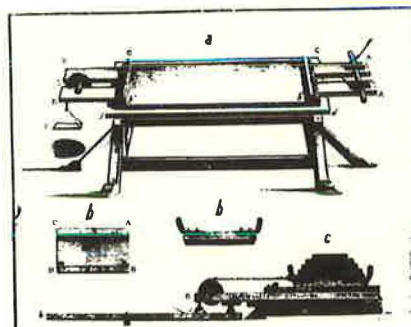


Fig 4 Coulomb's experimental apparatus for measuring the friction of wood

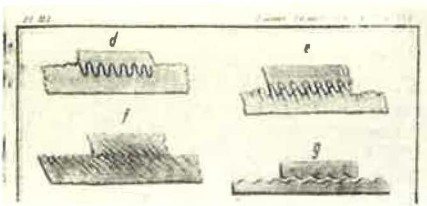


Fig 5 Coulomb's interpretation of dilatancy in the friction of wood

dilatancy; the increase of strength with time (which our late colleague Dr. Bjerrum called "time-hardening"); the decrease in friction to a residual value as the movement continues, and the effect of scale, also remind us of some of our modern ideas.

At the Secretariat, you can obtain a complete text of my lecture with further details of these two papers, as well as Coulomb's paper on underwater excavation, which was his best-seller.

In 1802, Coulomb presented his last paper to the Academy, on magnetism. He was in his 67th year. Napoleon had made him Inspector General of Public Instruction. But his health had been increasingly affected by his work and by repeated bouts of fever. He lived on the Left Bank, on the Quai de la Monnaie, near the Institute; in his modest apartment he conducted his last experiments in electricity, and stayed in a room facing the courtyard because, he said, it was quieter there, and the vibrations from passing carriages in the street did not shake his torsion balance.

Where did his thoughts turn in the closing years of his life? What a strange destiny he had: he had wanted to be a mathematician; half disinherited by his mother who wanted him to be a doctor, he became an engineer, and then a physicist. Born under the monarchy, when only those privileged by birth had access to the "Grandes Ecoles", he succeeded by his own talent in forcing an entry for himself to the greatest of them all. The great gust of liberty from the revolution brought him high hopes; but in the excesses which followed it, he lost his friend Lavoisier. When calm returned, he fought for promotion based on ability alone. Dreaming of liberty, he died in 1806 at the age of 70, shortly after the coronation of the Emperor.

Did he foresee the extraordinary developments which were to come in the applications of science to industry? Did he ever think how many suffices might follow his symbol  $c$  for cohesion? Could he have guessed that one day we would build earth dams 300m high? It has been said that all those who have distinguished themselves

by new insights have shown the germ of their discoveries in their first work. Is it possible that in his last days, he thought of his engrossing work as an engineer under the Caribbean sun, or remembered his fascinating research on soil mechanics and the strength of materials?

Fort Bourbon has withstood the passing of two centuries (Fig.6), but it never served any useful purpose. What does it matter? The value of the work lies not in itself, but in the developments to which it led.

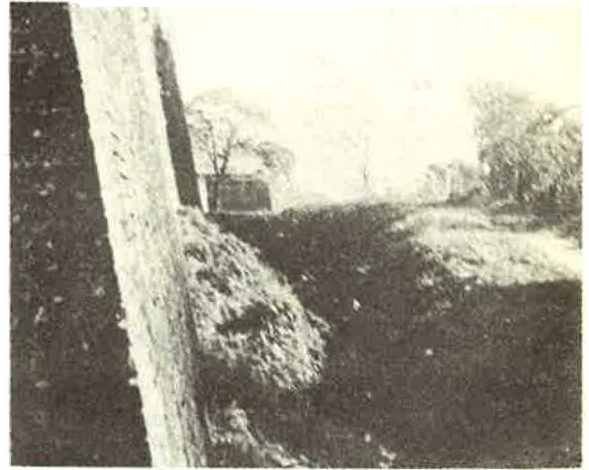


Fig 6 The remains of Fort Bourbon

We can say with satisfaction that, although Coulomb's work in soil mechanics is less well-known, it was the outstanding work of his youth, it never ceased to preoccupy him, and it opened the way for him to other fruitful fields of enquiry.

Can we not draw from his life the lesson that a broad scientific education is essential for the creativity of the engineer and the physicist, and that the latter must have gifts both for intuitively finding the principal parameters in his experiments, and for the observation of facts.

It was Lenin, Mr. Chairman, one of your eminent compatriots, who said: "Facts are stubborn; the truth is always tangible." Apparently indifferent to social events, Coulomb applied this maxim to his life as a physicist and engineer.

At the opening of this conference, Coulomb has something valuable to say to us. I shall be happy, Ladies and Gentlemen, if I have been able to interpret him to you so as to convey his essential message.

## REFERENCES

1. Archives of the Department of Hérault, Series D, 120(5), fol119.
2. Archives of the Department of Ille et Vilaine (1783). "Précis des opérations relatives à la navigation intérieure de la Bretagne - Rapport de M.Coulomb et Procès-Verbal des vérifications indiquées entre les rivières de la Mayenne et de la Vilaine."
3. Archives of the Army (Vincennes) (1761) Engineering; College of Mézières Xth, 5, "Mézières", 2nd and 4th December, 1761.
4. BELIDOR, B.F. (1729) "La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile." Paris.
5. BELIDOR, B.F. (1755) "Dictionnaire portatif de l'ingénieur." Paris.
6. COLLIN, A. (1846) "Recherches expérimentales sur les glissements des terrains argileux, accompagnées de considérations sur quelques principes de la mécanique terrestre. Carrillan Coeury, Paris.
7. COULOMB, C.A. (1773) "Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture." Mémoires de Mathématiques et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers savants, et lus dans ses Assemblées. 7, 343-82 (1776). Reprinted in Théorie des machines simples, Paris 1809 and 1821.
8. COULOMB, C.A. (1779) "Recherches sur les moyens d'exécuter sous l'eau toutes sortes de travaux hydrauliques sans employer aucun épuisement." Original manuscript in Library of Acad. Sci., then 2nd ed. by citizen COULOMB (1797), Du Pont printer, Paris.
9. COULOMB, C.A. (1781) "Théorie des machines simples" Library of Acad. Sci.; Savants Etrangers TX SE 161-332.
10. COULOMB, C.A. (1799) Mémoires de l'Institut; First Series, II, pp. 340-428.
11. DELAMBRE, J.B. (1806) Eloge historique de M.COULOMB. Histoire de la classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut National de France. 7, 206, Paris.
12. EULER, L. (1744) "Methodus inveniendi lineas curvas Maximi Minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti." Lausanne and Geneva.
13. GAUTIER, H. (1717) "Dissertation sur l'épaisseur des culées des ponts..." Paris.
14. GILLMOR, C.S. (1968) "Charles Augustin Coulomb: Physics and engineering in eighteenth century France", Ph.D. dissertation, Princeton University; University Microfilm no. 69-2741. Published as "Coulomb and the evaluation of physics and engineering in eighteenth century France", Princeton University Press, 1971.
15. HEYMAN, J. (1972) "Coulomb's memoir on statics", Cambridge, at the University Press.