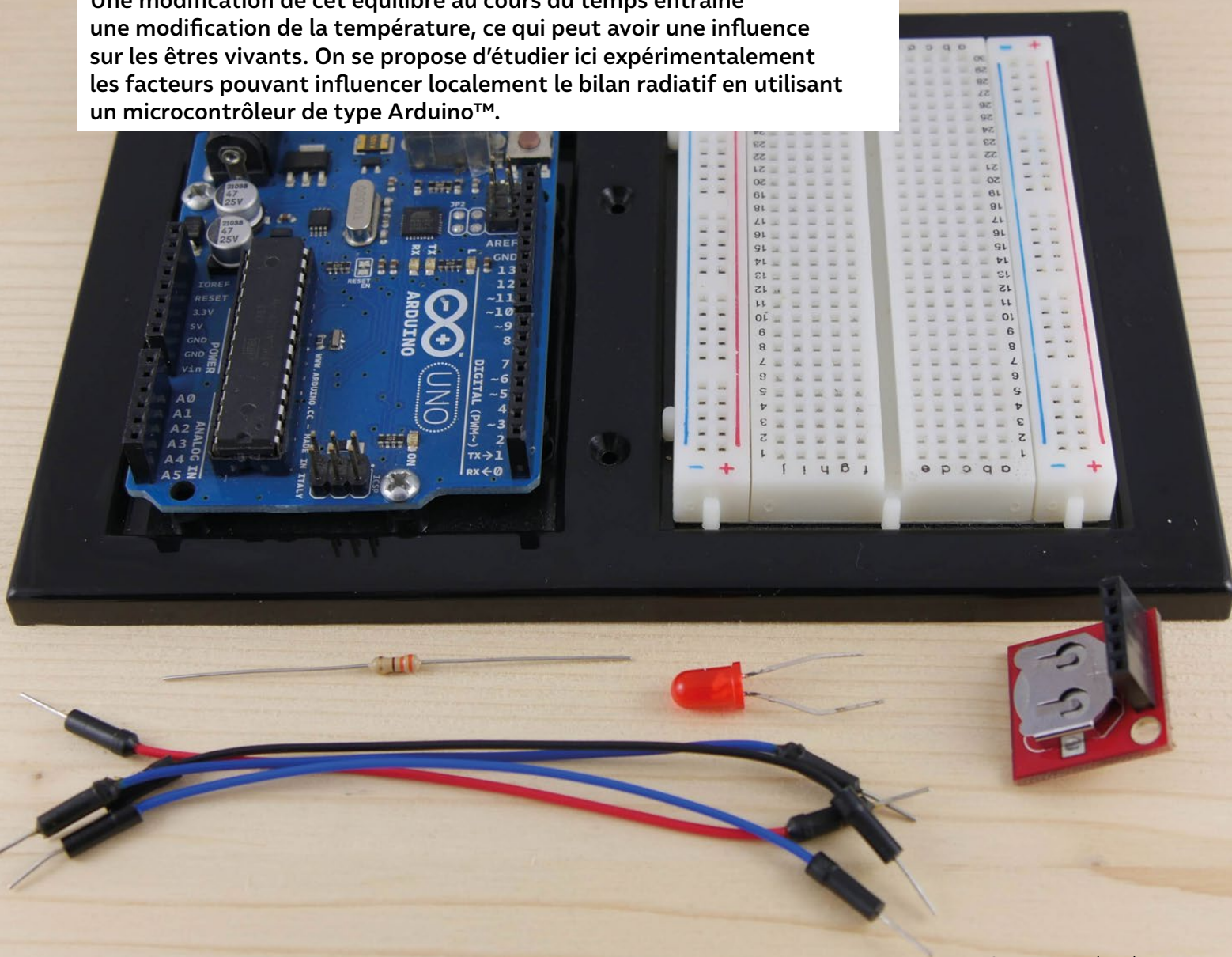


1

PROJET : Approche expérimentale et numérique du bilan radiatif terrestre

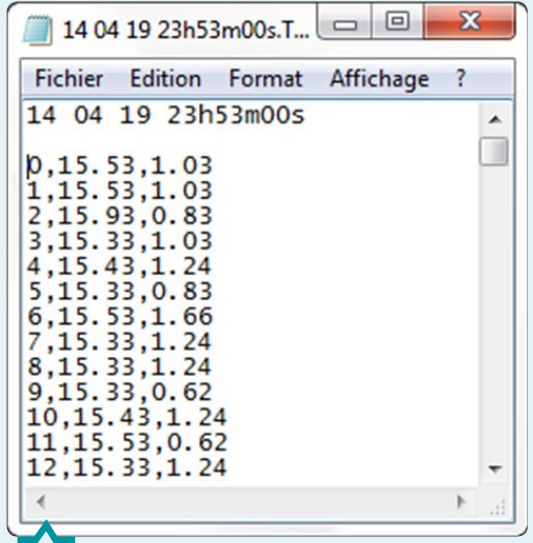
La température à la surface de la Terre permet la présence d'eau à l'état liquide, indispensable à la vie. Elle résulte de l'équilibre entre l'énergie solaire reçue par la Terre et l'énergie dissipée : c'est le bilan radiatif. Une modification de cet équilibre au cours du temps entraîne une modification de la température, ce qui peut avoir une influence sur les êtres vivants. On se propose d'étudier ici expérimentalement les facteurs pouvant influencer localement le bilan radiatif en utilisant un microcontrôleur de type Arduino™.



© www.carnetdumaker.net

a. Pour étudier l'évolution du bilan radiatif, il faut pouvoir dater les données enregistrées.

► **Comment peut-on repérer les données dans le temps avec un montage utilisant un microcontrôleur ?** → activité 3

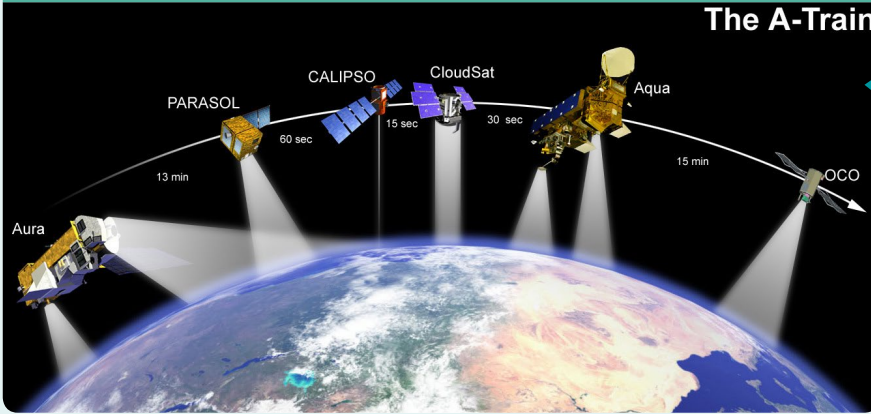


b. Localement, le bilan radiatif dépend de nombreux paramètres.
 ► **Comment peut-on relier ces différents paramètres au bilan radiatif?** → activité 1

c. Un montage expérimental utilisant un microcontrôleur permet d'enregistrer un grand nombre de données.
 ► **Comment traiter et analyser les données recueillies?** → activité 4

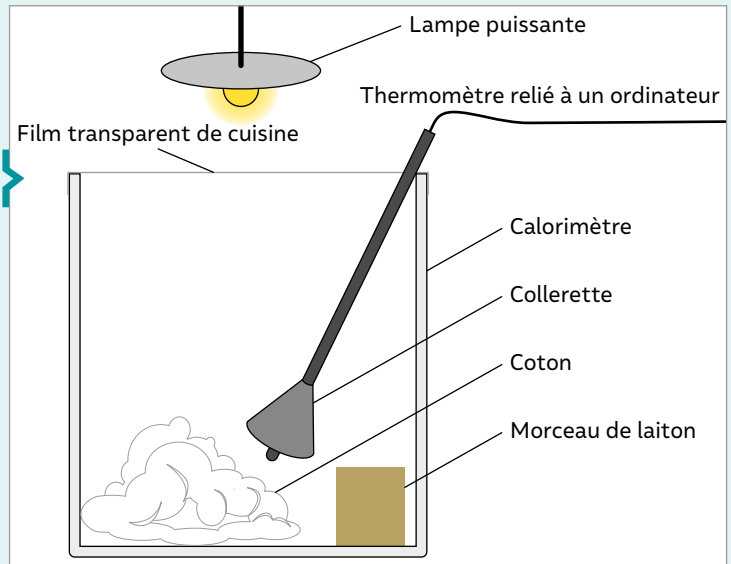


TEASER



d. A-Train est une constellation de satellites embarquant chacun des capteurs spécifiques et permettant d'étudier l'atmosphère et l'évolution du climat.
 ► **Quels types de capteurs permettent d'étudier le bilan radiatif local?**
 → activité 2

e. Lorsqu'on réalise une expérience, il est important de prendre conscience de ses points forts et de ses limites.
 ► **Comment critiquer un modèle ou un protocole?**
 → activité 5



La recherche d'une problématique

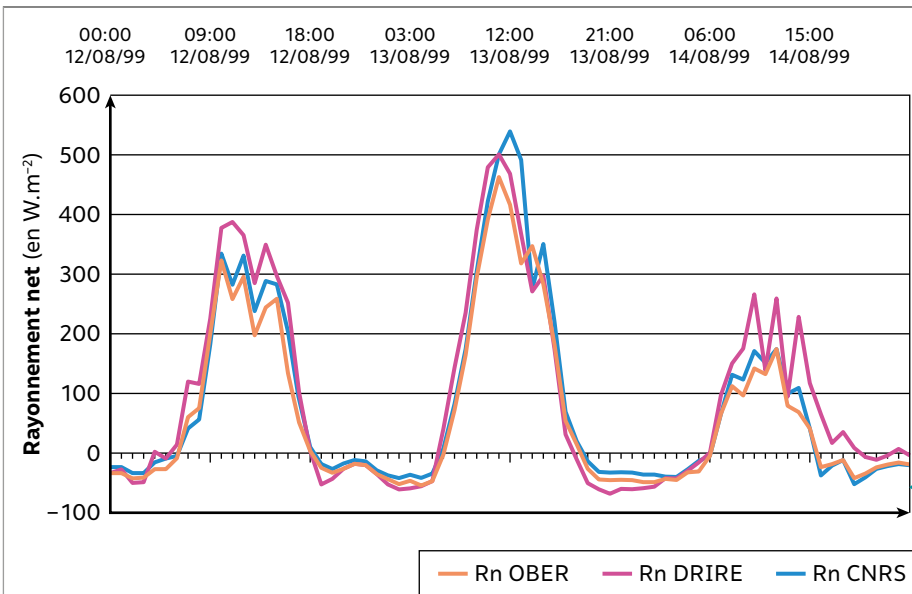
TÂCHE COMPLEXE

Le bilan radiatif est le résultat d'un grand nombre d'interactions. C'est un ensemble de grandeurs qui varient dans le temps, très sensibles aux variations de nombreux facteurs.

MISSION

Vous allez travailler en groupe durant plusieurs semaines sur un projet scientifique en lien avec le bilan radiatif. Commencez par définir votre problématique.

1 Variations d'une grandeur significative du bilan radiatif

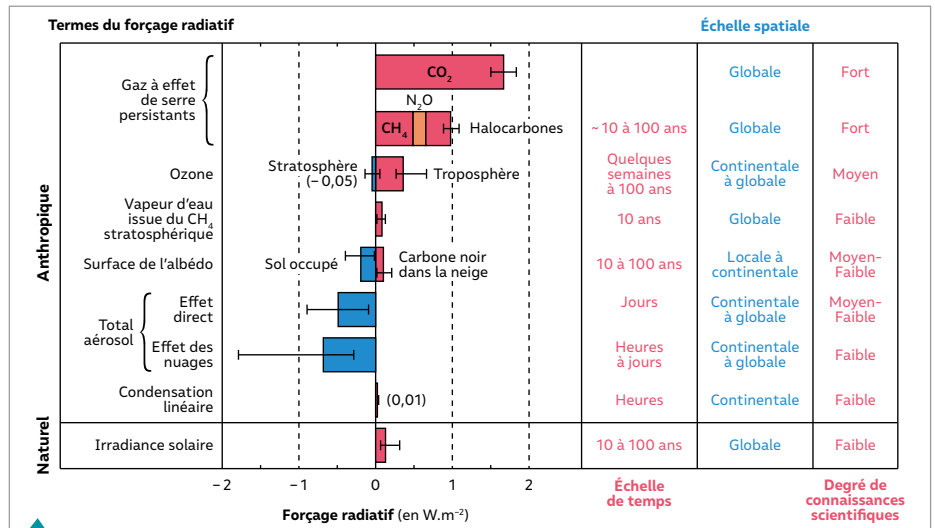


- Le rayonnement net correspond à la différence entre le gain d'énergie (absorption du rayonnement incident) et la perte d'énergie (émission de rayonnement).
- Il a été mesuré durant 3 jours, sur 3 sites différents d'une même agglomération. Le site DRIRE est urbain, tandis que les sites CNRS et OBER sont périurbains.

a. Variation du rayonnement net sur 3 sites de l'agglomération de Strasbourg

2 Activité humaine et bilan radiatif

- L'activité humaine entraîne l'émission de nombreuses particules de type aérosols et des gaz à effets de serre...
- Cela entraîne des conséquences variées : modification de la composition chimique de l'atmosphère, formation de nuages de fumée, poussières...
- L'activité humaine modifie de très nombreux paramètres, dont on ne peut pas isoler les effets dans la nature.



b. Le forçage radiatif (source : GIEC, 2017)

3 Des interactions complexes

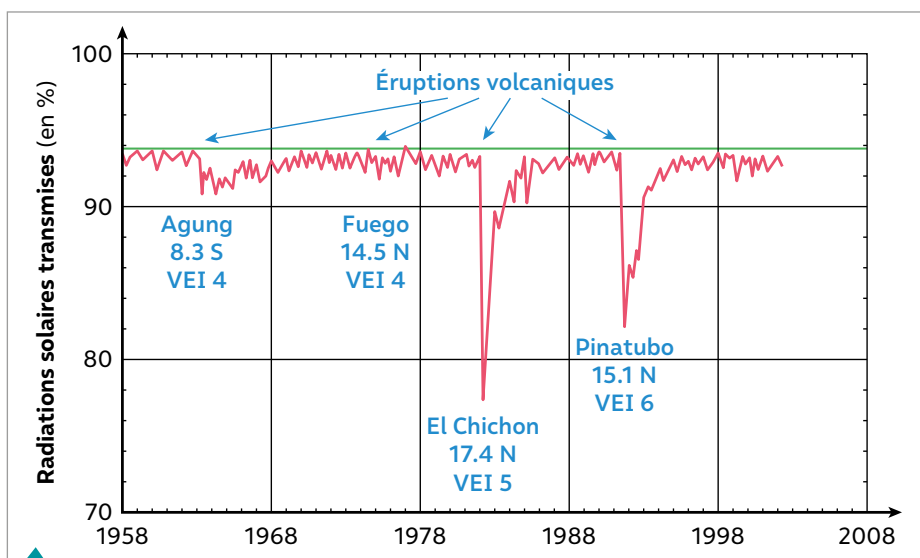
- Les effets d'une éruption volcanique sur le bilan radiatif sont difficiles à estimer.
- L'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre modifie la composition de l'atmosphère.
- L'émission des particules modifie aussi la réflectivité.
- L'équilibre radiatif dépend de plusieurs facteurs et varie selon l'éruption.



© gettyimages Stocktrek

c. Éruption du volcan Pinatubo aux Philippines en 1991,
l'une des plus importantes du xx^e siècle

- Pour mieux comprendre les effets des volcans sur le climat, les chercheurs accumulent des données sur les éruptions majeures récentes.
- Ils mettent ensuite en parallèle les variations mesurées pour différents paramètres intervenant dans le bilan radiatif avec ces éruptions.
- Le graphique ci-contre présente le pourcentage de radiations solaires parvenant au sol mesurées à l'observatoire de Mauna Loa depuis 1958. Les éruptions volcaniques majeures ayant eu lieu depuis lors sont identifiées sur le schéma.



d. Impact des éruptions volcaniques majeures sur le rayonnement solaire transmis à la surface

Pour chaque éruption sont indiqués le nom du volcan, sa latitude et son indice d'explosivité volcanique (VEI) qui est un indice variant de 0 à 8 (source : <https://www.esrl.noaa.gov>)

COUPS DE POUCE

- ▶ Relever les interrogations soulevées par les différents documents.
- ▶ Noter toutes vos idées, d'abord individuellement puis en groupe. Élargir le sujet tout en restant dans la thématique des mesures portant sur le bilan radiatif.
- ▶ Choisir d'abord un thème, puis définir une problématique simple, concise et cohérente.
- ▶ Si votre problématique est satisfaisante, la réponse doit nécessiter une recherche et impliquer une initiative personnelle : mise en œuvre et utilisation d'un capteur, acquisition numérique de données, traitement de ces données et interprétation des résultats obtenus.

Utiliser des capteurs adaptés aux mesures des grandeurs physiques significatives du bilan radiatif

TÂCHE COMPLEXE

Le bilan radiatif dépend de multiples paramètres dont il faut pouvoir évaluer les effets indépendamment des autres. Comment mesurer les principales grandeurs physiques dont dépend le bilan radiatif?

MISSION

- ▶ En groupe, proposer des expériences qui permettent de mettre en œuvre et d'utiliser des capteurs pour réaliser des mesures de grandeurs physiques significatives du bilan radiatif terrestre. Les expériences proposées devront indiquer le protocole retenu pour pouvoir faire des mesures précises et fiables.

1 Les principaux capteurs à utiliser

De nombreux capteurs sont utilisés dans l'étude du bilan radiatif. On trouve par exemple :

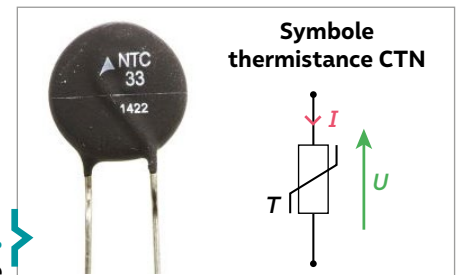
- Les capteurs de températures dans les thermomètres qui permettent de mesurer la température. Un montage simple permet de mesurer des variations de température à l'aide d'une thermistance par exemple. Il existe également des capteurs de températures prêt à l'emploi.
- Les photodiodes qui permettent de mesurer la puissance surfacique solaire arrivant jusqu'au sol.

Les mesures réalisées par ces capteurs doivent être indépendantes les unes des autres. Le positionnement d'un capteur est essentiel dans la réalisation d'une mesure fiable.

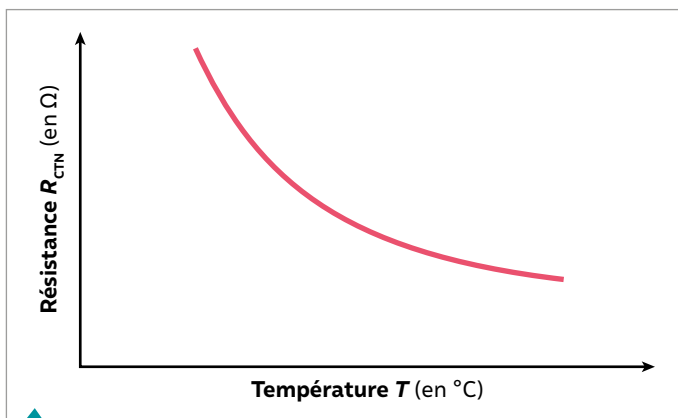
2 Un exemple de capteur de température : la thermistance

La mise en œuvre d'une thermistance à Coefficient de Température Négatif de résistance R_{CTN} permet de réaliser des mesures de température avec une précision de l'ordre de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il faut pour cela avoir connaissance de la courbe d'étalonnage de ce capteur.

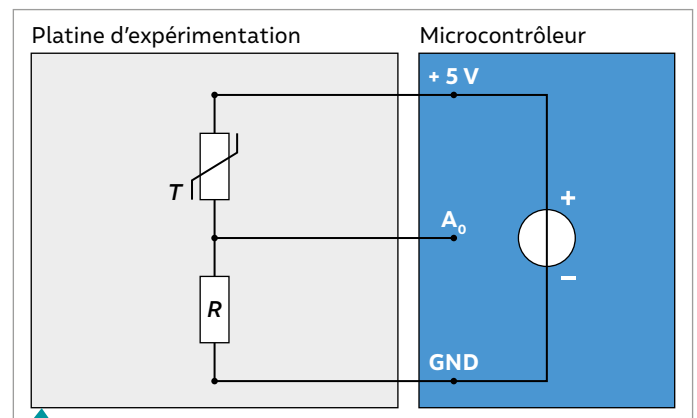
Ce type de capteur doit être intégré dans un circuit électrique généralement associé à un microcontrôleur.



a. Thermistance



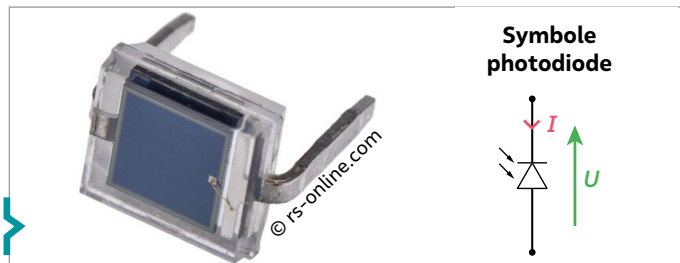
b. Courbe d'étalonnage d'une thermistance de type CTN



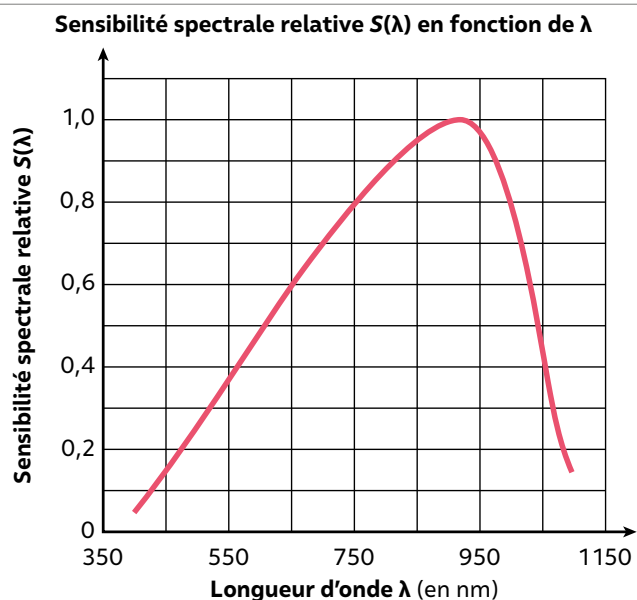
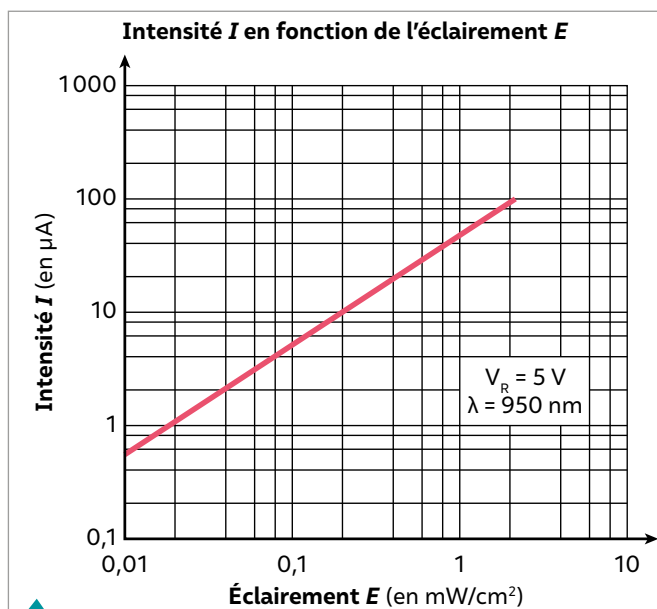
c. Mise en œuvre d'une thermistance dans un montage électrique avec un microcontrôleur

3 Un exemple de capteur de puissance surfacique : la photodiode

- Une photodiode est un capteur qui permet d'obtenir un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à l'éclairement énergétique qu'il reçoit pour une longueur d'onde donnée.
- La sensibilité de la photodiode dépend de la longueur d'onde du rayonnement reçu.

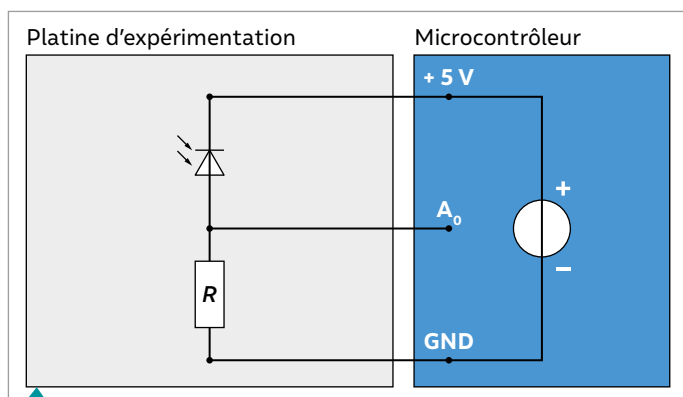


Photodiode BPW34



e. Quelques données utiles sur la photodiode BPW34

- D'après la loi d'Ohm $U = R \times I$, une résistance R associée à une photodiode peut servir de capteur de l'intensité I du courant électrique en raison de la proportionnalité entre la tension électrique U et l'intensité I .
- La tension U peut alors être échantillonnée et numérisée par un microcontrôleur qui peut calculer la valeur de l'intensité I et donc de l'éclairement E .



f. Mise en œuvre d'une photodiode dans un montage électrique avec un microcontrôleur

COUPS DE POUCE

- ▶ Pour être fiable, la mesure d'une grandeur réalisée par un capteur doit être comparée à des valeurs de référence. On peut obtenir ces valeurs soit directement avec un appareil mesurant la même grandeur dans les mêmes conditions que celles utilisées pour le capteur, soit de manière indirecte en récupérant des informations sur internet ou sur le site [site compagnon](#), issues de sources sûres, qui proposent des mesures de grandeurs en relation avec la problématique du bilan radiatif.
- ▶ Proposer une méthode pour obtenir une relation approchée de type linéaire entre l'intensité du courant électrique qui traverse la photodiode et l'éclairement moyen solaire E (entre 400 nm et 1 100 nm) reçu au niveau du sol.
- ▶ Choisissez de réaliser votre capteur vous-même ou bien d'en utiliser un déjà prêt : cela dépend de ce que vous souhaitez développer dans votre projet.

Enregistrer des mesures de grandeurs physiques significatives de l'évolution réelle du bilan radiatif au cours du temps

TÂCHE
COMPLEXE

Pour comprendre la complexité des interactions, il faut mesurer plusieurs paramètres de façon simultanée. L'enregistrement de la date et de l'heure pour le repérage temporel des données est indispensable. Nous vous recommandons de vous référer à la fiche technique 10 « Stocker des données avec un microcontrôleur (carte SD) ».

MISSION

- Concevoir ou choisir un système capable d'enregistrer simultanément plusieurs mesures significatives du bilan radiatif au cours du temps.

1 Utiliser une horloge pour repérer les données dans le temps

- Lorsqu'on réalise une série de mesures au cours du temps, celles-ci doivent être associées à une date qui permet de repérer l'instant auquel la mesure est réalisée. Ceci est possible grâce à une **horloge** qui peut être celle d'un ordinateur, associée à une carte d'acquisition ou celle que l'on trouve dans les cartes à microcontrôleur.
- On peut également utiliser une **horloge externe** ce qui peut être une solution très intéressante car le module est capable d'intégrer une base de données comportant les jours, les mois et les années (y compris les années bissextiles).
- L'enregistrement d'une ou plusieurs données doit être synchronisé avec la date fournie par l'horloge au moment précis où les mesures sont réalisées.
- Quelle que soit la solution retenue, il est nécessaire de réaliser une **procédure de mise à l'heure** ou d'associer l'heure réelle à la première mesure de la série lorsque les mesures s'effectuent à intervalle de temps régulier. Il faut une origine aux dates associée au début de l'enregistrement des mesures. La précision d'une horloge externe étant de quelques secondes par jour, il faut la remettre à l'heure (atomique) de temps en temps.



a. Horloge externe

2 Stocker les données en temps réel sur un support

- L'enregistrement des données en temps réel doit se faire sur un support physique.
 - Il peut se faire directement sur le disque dur d'un ordinateur (ou une clé USB) mais cela suppose que l'ordinateur reste en fonctionnement en permanence. Cette solution ne convient que lorsque l'ordinateur peut rester à l'abri dans un local et que son fonctionnement est dédié aux mesures en temps réel.
 - Si l'on envisage de faire des mesures sur le long terme et directement sur site, il faut prévoir un système capable de fonctionner en autonomie :
- l'utilisation d'un système intégrant un microcontrôleur associé à un module lecteur de carte microSD est alors parfaitement adapté (voir photo ci-contre). On peut aussi prévoir un boîtier pour protéger la carte à microcontrôleur et la platine d'expérimentation des intempéries. Les capteurs seront généralement placés à l'extérieur du boîtier. L'énergie nécessaire au fonctionnement pourra être une alimentation branchée sur le secteur ou, mieux encore, un chargeur solaire USB associé à une batterie qui permettra de rendre le module complètement autonome.



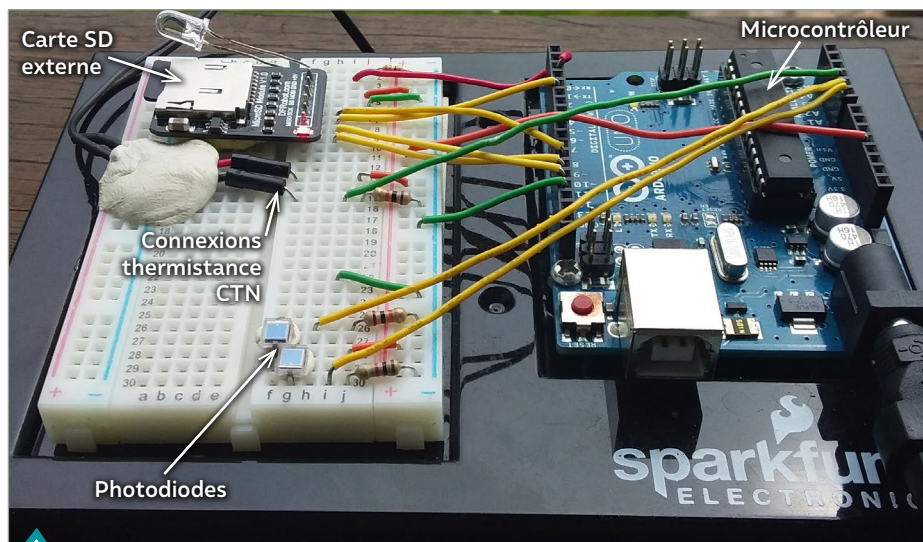
b. Module lecteur de carte microSD

3 Le formatage des données et le choix d'un système d'acquisition

L'enregistrement des données sur site doit obéir à certaines règles pour que l'exploitation des données soit possible. Il faut au minimum :

- Définir la période d'échantillonnage des données.
- Préciser la date du début de l'enregistrement sur le capteur si on n'utilise pas d'horloge externe.
- Veiller à ce que l'amplitude des données reste dans un intervalle compatible avec la plage d'entrée du convertisseur analogique numérique du système d'acquisition retenu.

L'utilisation d'un microcontrôleur ou d'un nano-ordinateur est bien adaptée mais nécessite le développement d'un code informatique pour le traitement des valeurs numérisées brutes ainsi que pour l'enregistrement des données issues des signaux fournis par les capteurs.



c. Montage expérimental comportant un capteur de température, un capteur d'éclairement, une carte SD associés à un microcontrôleur.

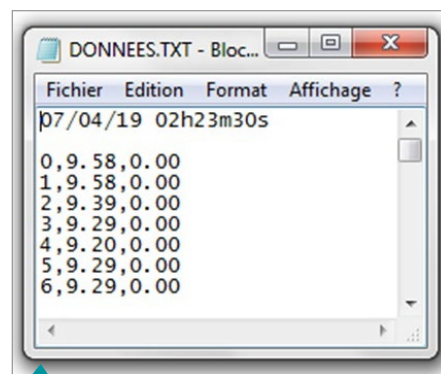


VOCABULAIRE

Le **rayonnement électromagnétique** désigne un mode de transfert d'énergie qui peut être décrit sous forme d'une onde caractérisée par sa fréquence ou encore sa longueur d'onde. La lumière visible est un ensemble de rayonnements électromagnétiques, mais ne constitue qu'une petite partie du large spectre électromagnétique.

La **puissance surfacique** reçue est la puissance reçue par unité de surface, c'est-à-dire par mètre carré. L'unité est le $W \cdot m^{-2}$.

La **numérisation** de ce signal le transforme en une variable qui ne prend qu'un nombre fini de valeurs, en général à intervalle de temps régulier que l'on appelle la **période d'échantillonnage**.



d. Exemple d'enregistrement de données formatées dans un fichier texte

Les systèmes d'acquisitions classiques donnent directement accès à la période d'échantillonnage mais ils sont limités à un nombre maximal d'échantillons. L'utilisation d'un logiciel comme Audacity pose un problème car il est fait pour enregistrer des grandeurs à variations rapides au cours du temps et non des grandeurs qui évoluent lentement comme celles du bilan radiatif.

COUPS DE POUCE

- ▶ Déterminer sur quel intervalle de temps vous souhaitez faire des mesures pour répondre à votre problématique initiale : sur quelques heures, sur 24 h, pendant quelques jours, sur plusieurs mois d'affilés...
- ▶ Choisissez le système d'acquisition le mieux adapté à votre projet. Il doit être réalisable en fonction du matériel disponible dans votre établissement et des contraintes matérielles de celui-ci.
- ▶ Estimer le temps qu'il vous faudra pour mettre en œuvre un système efficace et faire les premiers essais concluants. Pour atteindre votre but, il faut définir le rôle de chacun au sein du groupe.

Traiter et analyser les données pour comprendre la complexité des relations entre les différents paramètres

TÂCHE COMPLEXE

Après avoir enregistré des mesures, il est nécessaire de les traiter, sous forme de représentations graphiques par exemple, puis de les analyser pour pouvoir comprendre la complexité des interactions.

MISSION

- Définir une méthode et choisir des techniques pour réaliser le traitement et l'analyse des données puis mettre en œuvre cette méthode et ces techniques.

1 Le traitement des données expérimentales

Pour tirer des informations des données expérimentales, il est nécessaire de les traiter pour pouvoir en faire une lecture la plus simple et la plus rapide possible. Ce traitement des données doit être envisagé sous plusieurs aspects :

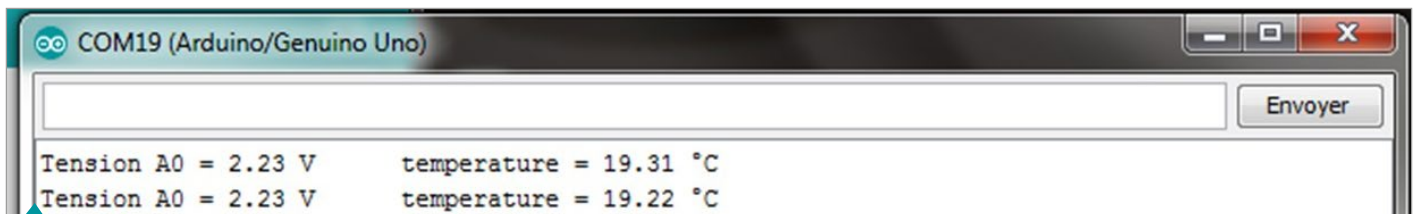
● Le formatage des données

Si on utilise un système d'acquisition expérimental avec microcontrôleur, il est souvent nécessaire de réaliser une conversion de format de ces données pour les rendre lisibles par le logiciel ou le programme qui va les traiter (voir les différentes fiches techniques sur la conversion de données).

● Le traitement des données brutes

Certaines données sont directement reliées aux tensions numérisées par le microcontrôleur : ces données, dites

« brutes », nécessitent un calcul pour être converties en une grandeur physique. Par exemple, une photodiode produit un courant d'intensité I proportionnelle à l'éclairement qu'elle reçoit pour une longueur d'onde donnée. La puissance surfacique arrivant sur la surface du capteur peut être calculée à partir de la valeur numérisée de la tension aux bornes de la résistance traversée par le courant d'intensité I en utilisant les données du paragraphe 3 de l'activité 2. Après traitement des données brutes par le microcontrôleur, celles-ci peuvent être stockées en temps réel sur une carte microSD.



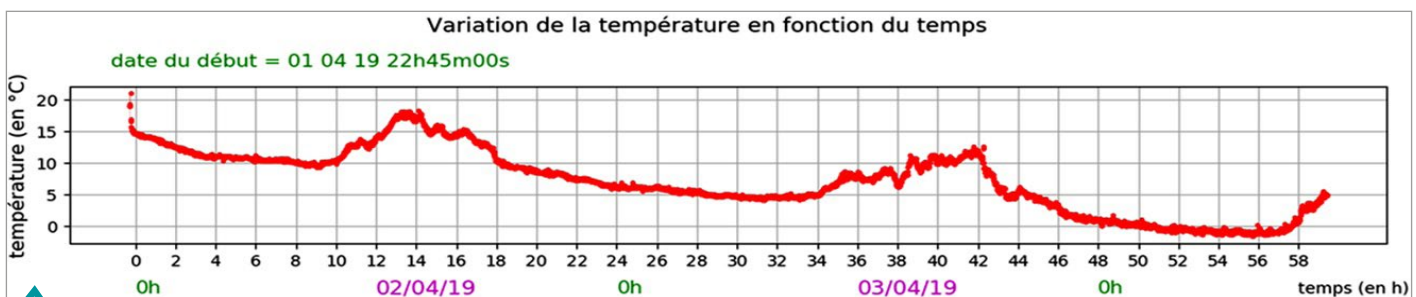
a. Traitement de la tension numérisée sur l'entrée A0 d'un microcontrôleur Arduino donnant une température

● L'ergonomie de la représentation graphique

Si ces données ont été enregistrées toutes les minutes et que l'enregistrement a duré plusieurs jours, la lecture d'une représentation graphique temporelle des données ne sera pas facile avec un axe gradué en centaines de minutes. L'utilisation d'une graduation de l'axe des temps en heures

et jours sera plus adaptée et les données devront être converties en heures et jours à l'aide d'un calcul.

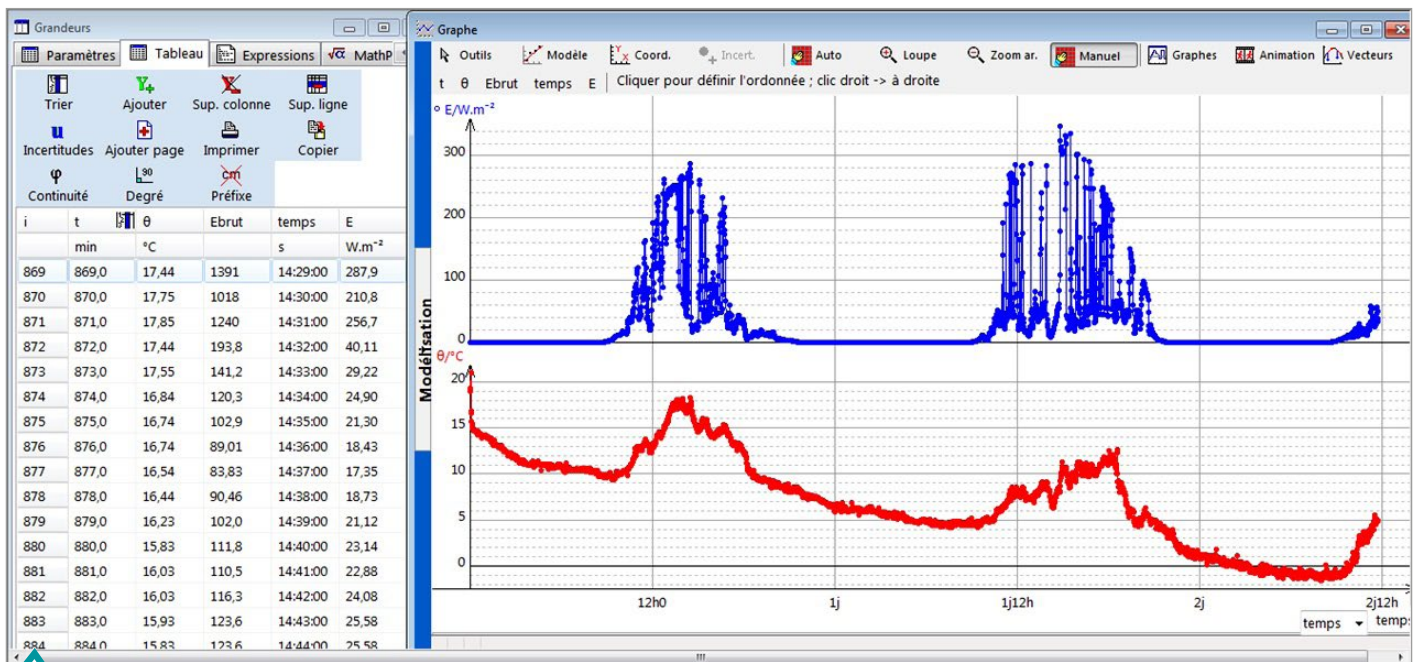
Enfin, s'il s'agit de représenter plusieurs grandeurs au cours du temps, doit-on utiliser une seule représentation graphique avec plusieurs axes ou plusieurs graphiques superposés avec une seule grandeur par graphique ?



b. Représentation graphique, obtenue avec Python, de la variation de température du 02 au 03/04/19

2 Les différentes solutions pour traiter et représenter les données

- Les **systèmes d'acquisition** avec capteurs dédiés couplés à un environnement de représentation graphique réalisent automatiquement la conversion de données ce qui est très avantageux en terme de gain de temps. Cependant ces systèmes n'offrent pas la souplesse d'un système d'enregistrement à microcontrôleur que l'on peut adapter aux contraintes des mesures à réaliser sur une grande échelle de temps, et que l'on peut rendre entièrement autonome.
- Le **tableur généraliste**, de type Open Calc par exemple, permet de réaliser des calculs et de faire des représentations graphiques à partir de données. Ce type de tableur n'étant pas spécialement dédié au traitement de données scientifiques, sa mise en œuvre peut s'avérer un peu complexe pour des besoins spécifiques.
- Le **tableur scientifique**, de type Regressi par exemple, permet de réaliser simplement et rapidement des calculs, possède de puissantes fonctions de modélisation et de nombreux types de représentations graphiques.



c. Représentation graphique, obtenue avec le tableur Regressi, des variations d'éclairement (en bleu) et de température (en rouge) du 02/04/19 au 03/04/19

- Le **langage de programmation Python** est une solution extrêmement puissante pour le traitement de données. L'utilisation de la bibliothèque **Matplotlib** permet de réaliser, avec souplesse et précision, des représentations graphiques intégrant tous les éléments que l'on souhaite représenter, comme par exemple la date et l'heure avec une échelle parfaitement adaptée de la dernière figure de la partie 1. Il faut cependant plus de temps pour obtenir le résultat souhaité car il est nécessaire de programmer.

COUPS DE POUCE

- Déterminer de quelle manière vous souhaitez traiter les données : traitement directement intégré dans le programme d'acquisition avant le stockage des données ou traitement réalisé après extraction des données par un tableur ou un avec un langage de programmation.
- Proposer plusieurs méthodes adaptées aux traitements de chaque type de données que vous envisagez d'enregistrer dans le cadre de votre projet. Le traitement d'une série de données brutes devra se traduire par l'obtention d'une série de données de valeurs égales aux valeurs prises réellement par la grandeur physique en fonction du temps (voir coups de pouce de l'activité 2).

Avoir un regard critique

TÂCHE
COMPLEXE

Pour mener votre projet, vous avez réalisé diverses expériences : modélisations, mesures en laboratoire, mesures en extérieur, etc.

MISSION

- ▶ Prendre du recul par rapport au travail réalisé et avoir un regard critique. Distinguer un travail sur un modèle d'un travail sur des données de terrain.

1 Critiquer un modèle

- En classe de seconde, des élèves mettent en place une modélisation pour comprendre l'effet de serre : ils placent deux sondes thermiques dans deux cristallisoirs éclairés, l'un recouvert d'une plaque de verre et l'autre non. Ils mesurent l'évolution de la température au cours du temps.
- Ils veillent à utiliser des sources lumineuses identiques et placées de la même façon.
- Après 40 minutes, la température a augmenté plus fortement dans le cristallisoir recouvert d'une plaque que dans l'autre.
- Les élèves s'interrogent sur leur dispositif et ce qu'il montre réellement.

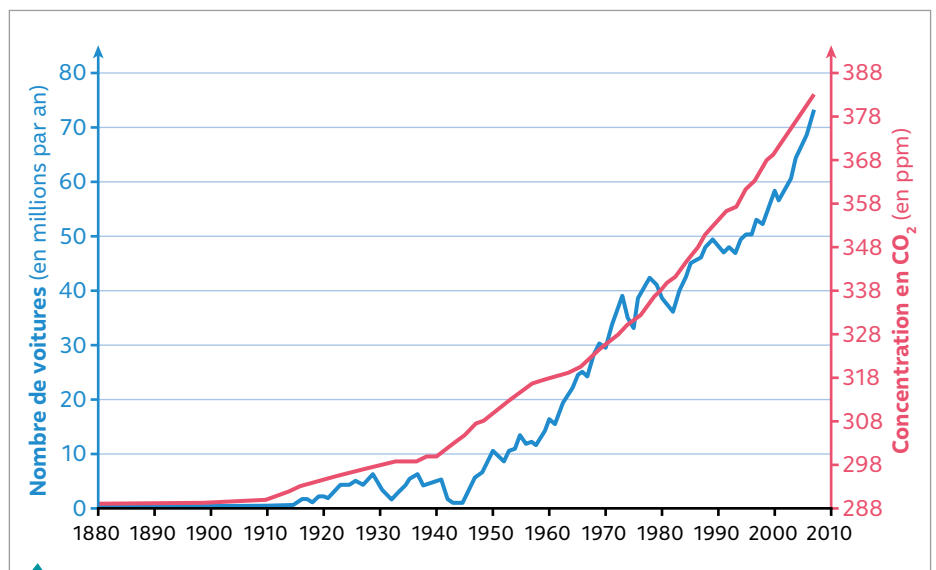


a. Modélisation de l'effet de serre mise en place par les élèves de 2^{de} (source : ENS Lyon)

© acces.ens-lyon.fr

2 Établir des liens entre des phénomènes

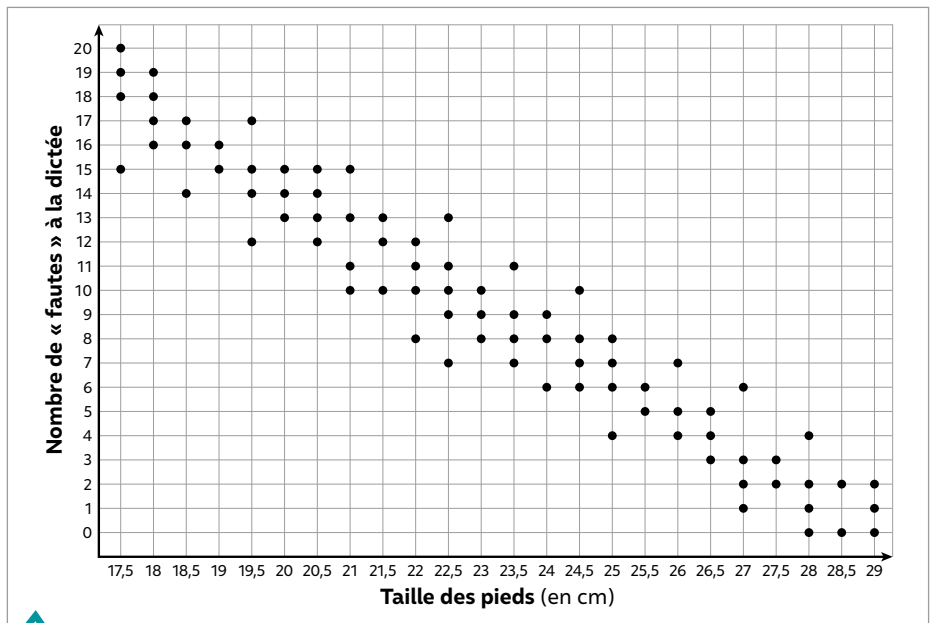
- Comme vous l'avez vu dans le chapitre Bilan radiatif, de nombreux paramètres sont en interaction (voir schéma bilan p. 127).
- Pour mettre en évidence les relations entre ces paramètres, il faut comparer leur évolution au cours du temps.
- On peut ensuite comparer les résultats obtenus à ceux qui sont attendus d'après les résultats validés par les scientifiques.
- Le chapitre 5 « Le bilan radiatif terrestre » présente de nombreux documents scientifiques et peut ainsi être exploité. Des ressources complémentaires peuvent être trouvées sur Internet si besoin. Attention toutefois à bien vérifier vos sources.



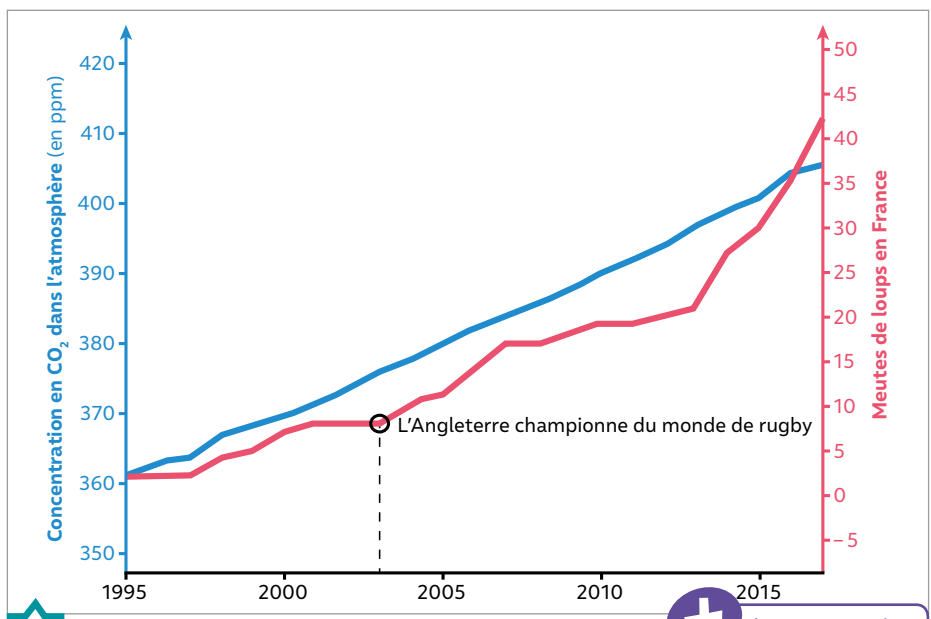
b. Évolution comparée de la production automobile mondiale et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère

3 Des interactions complexes

- On peut parfois observer un lien statistique entre deux variables. On parle alors de corrélation entre ces deux variables.
- Quand l'une de ces deux variables agit sur l'autre, on parle de causalité.
- Une corrélation peut être observée avec ou sans relation de causalité.
- Sur le plan scientifique, la mesure simultanée de différents paramètres peut permettre d'établir des corrélations. Pour établir en plus une causalité, il faut démontrer que l'une de ces variables agit sur l'autre.
- Une relation de causalité peut être liée à une variable cachée. Par exemple, le graphique **c** présente une corrélation entre la taille des pieds et le niveau d'orthographe. Il n'y a pas de lien de causalité entre les deux, mais les deux ont une cause commune. À vous de la chercher !
- Il arrive aussi qu'on observe une corrélation sans qu'il n'y ait le moindre lien entre les variables, comme le montre le graphique **d**.



c. Une corrélation liée à une variable cachée : performances en orthographe et taille des pieds (source : la main à la patte : <https://www.fondation-lamap.org/fr/page/62537/cette-cause-qui-nen-etait-pas-une>)



d. Exemple de corrélation sans causalité

+ Autres exemples

COUPS DE POUCE

- ▶ Dans l'expérience réalisée par les élèves de seconde, identifiez les transpositions réel/modèle : que modélisent la lampe, le cristalliseur, le fond sombre, la plaque de verre ?
- ▶ Critiquez cette transposition : ce dispositif permet-il réellement d'étudier l'effet de serre ? Pourquoi ?
- ▶ Mettez en œuvre le modèle proposé, et comparez les données issues de ce modèle à des données de terrain que vous rechercherez sur Internet.
- ▶ Déterminez la nature de votre travail : s'agit-il d'une modélisation, de données de terrain ? Si c'est une modélisation, identifiez les transpositions faites et critiquez-les.
- ▶ Analysez vos résultats : comparez l'évolution des différentes grandeurs physiques intervenant dans le bilan radiatif à partir de vos expériences. Avez-vous pu établir des corrélations entre les différentes grandeurs physiques que vous avez étudiées ? Avez-vous pu mettre en place une expérience qui permette d'établir un lien de causalité entre ces grandeurs physiques ?
- ▶ Confrontez les résultats que vous avez obtenus avec des données de terrain (on pourra par exemple trouver des données sur le site de Météo France).
- ▶ Les liens que vous avez mis en évidence entre les variables sont-ils conformes à ceux attendus ? Si non, quelle peut être la cause de ces différences observées ?