

Lumière et sons : les apports de l'informatique aux nouveaux programmes

par Gérard SERRA, Michel TROPIS et Claude BOUYSET
I.D.E.A.O. - Laboratoire des Méthodes Modernes d'Enseignement
Université Paul Sabatier - 118, route de Narbonne
31062 Toulouse Cedex

1. PRÉSENTATION

Cette recherche s'est développée dans l'esprit et le contenu des nouveaux programmes de Physique et Chimie pour la classe de Seconde, et l'option de Première en application depuis la rentrée 1993. Elle peut aussi être mise en application dans l'option I.E.S.P. : Description d'un convertisseur analogique numérique.

Objectifs en Seconde

«Il s'agit de faire comprendre au travers d'une Physique vivante, bien ancrée sur les activités humaines, professionnelles et ludiques :

- que la Physique contribue au niveau fondamental à rendre notre monde intelligible ou en d'autres termes qu'elle permet de "l'expliquer" avec un petit nombre de lois,
- que ces lois sont valables dans leur domaine d'adéquation et nécessitent dans leur utilisation un langage mathématique souvent accessible (linéarité ou proportionnalité par exemple),
- que ces lois permettent de prévoir et d'imaginer des phénomènes ou des objets nouveaux,
- que ces lois sont à la base du fonctionnement de tous les dispositifs techniques et appareils en tous genres, de la haute technologie spatiale au domaine médical en passant par la vie quotidienne».

Premier objectif : «Acquisition ou amélioration des méthodes de travail».

Deuxième objectif : «Pratique des Sciences expérimentales».

Pour la Physique, le thème directeur est «LUMIÈRE ET SONS».

Objectifs en Première (option)

«Tout en favorisant la méthode expérimentale, la rigueur, l'apprentissage des lois physiques et l'approche théorique, le cours et les activités doivent être ouverts sur l'extérieur. Il s'agit de montrer que la Physique permet de comprendre l'Univers certes, mais de montrer également qu'elle est la base de toutes les techniques».

J'ai orienté mon travail vers la mise au point de séquences pédagogiques permettant à des élèves de réaliser la synthèse de sons ou la synthèse de couleurs, ce qui a nécessité la mise en œuvre d'une réalisation matérielle et d'une réalisation logicielle.

2. RÉALISATIONS MATÉRIELLES

2.1. Convertisseurs Numérique-Analogique

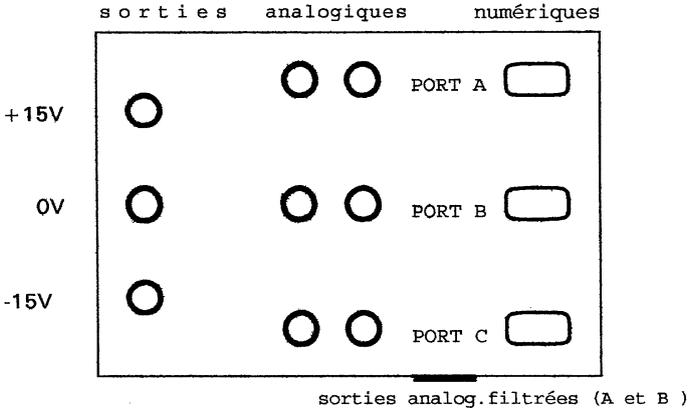
Le point de départ est un ordinateur Compatible PC, muni d'une carte d'acquisition (en l'occurrence CANDIBUS). Ses trois ports numériques : A, B et C, configurés en sortie, réalisent physiquement un octet sous forme de niveaux logiques. Cet octet est entré dans l'ordinateur, à l'aide d'un langage évolué (j'ai utilisé TurboPascal 6.0). Une interface utilisateur (turbo Vision), rend cette opération plus intuitive.

J'ai réalisé un ensemble de trois Convertisseurs Numérique-Analogique 8 bit (le DAC 0808 de National Semiconductor), implantés sur un Circuit Imprimé Époxy. Les deux premiers sont suivis chacun d'un filtre passe-bas Butterworth, à 18 dB par octave, dont l'intérêt sera précisé plus loin. L'aspect technique est détaillé en **Annexe**. On obtient ainsi les tensions analogiques correspondantes.

L'ensemble est placé dans un boîtier métallique (15,5 cm × 11 cm × 6 cm), d'où sort un câble blindé vingt-quatre brins terminé par un connecteur DB25 femelle, afin d'assurer la liaison avec CANDIBUS. L'alimentation symétrique + 15 V, - 15 V, est une récupération des pH-mètres du Centre (ainsi que le boîtier métallique !).

La face supérieure porte trois fiches bananes femelles pour l'alimentation et trois paires de fiches bananes pour les sorties analogiques A, B, C, non filtrées. Elles sont respectivement en regard de trois connecteurs DB9 mâles qui permettent de reprendre les sorties numériques de CANDIBUS. Sur la face avant, une fiche DIN femelle

donne accès aux sorties A et B filtrées. Le niveau permet d'attaquer un casque ou une entrée ligne.

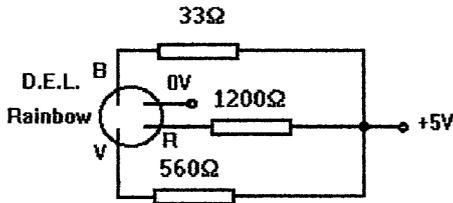


2.2. Optique pour la synthèse des couleurs

J'ai utilisé une diode électroluminescente tricolore RVB dénommée «Rainbow». L'intérêt de cette triple D.E.L. est de donner trois radiations monochromatiques :

- 635 nm pour le Rouge,
- 565 nm pour le Vert,
- 470 nm pour le Bleu.

Le fabricant recommande des valeurs de courant d'alimentation spécifiques pour obtenir du blanc. A partir d'une tension continue de +5 V, chaque anode est reliée par un résistor dont la valeur est indiquée sur le schéma.

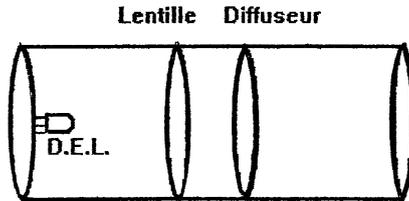


Disposition des résistors pour obtenir du blanc.

On peut obtenir toutes les teintes désirées en alimentant chaque «couleur» avec une tension appropriée. On a la possibilité de modifier

facilement chacune des tensions, entre 0 et 5 V, par deux cent cinquante six valeurs différentes. Il suffit d'écrire un entier dans le Port correspondant. On peut ainsi créer $256 \times 256 \times 256 = 16,7$ millions de couleurs !

La plaque de circuit imprimé qui porte la triple D.E.L. et les résistors associés, est placée dans un tube PVC, perpendiculairement à son axe et de telle manière que la partie émettrice soit au foyer objet d'une lentille convergente de 11 cm de focale. Un écran diffuseur est disposé derrière cette lentille tout en étant protégé de la lumière ambiante par la dernière partie du tube.



3. RÉALISATIONS LOGICIELLES

3.1. Synthèse des couleurs

Le but du logiciel **TRICHROM**, est de fournir trois valeurs entières comprises entre 0 et 255, aux Ports A, B et C. On obtient après conversion numérique-analogique, les trois tensions qui alimentent la triple D.E.L. Le résultat est donc la **synthèse additive des couleurs**. Deux méthodes sont possibles :

- soit on entre au clavier les trois nombres et, après validation, on peut observer la couleur correspondante,
- soit le logiciel, par le biais de procédures écrites à l'avance, engendre des séries de valeurs destinées à produire un effet particulier.

Dans le premier cas, une **feuille de manipulation**, précise à l'élève les limites des trois nombres à entrer, toujours dans le même ordre ; NR (rouge), NV (vert), NB (bleu).

On produira ainsi les couleurs primaires avec une saturation maximale obtenue en donnant à ces nombres la valeur 255.

On recherchera ensuite les additions, deux à deux, de ces couleurs primaires, ce qui donne les couleurs complémentaires. Ceci donnera l'occasion de bien faire la différence avec les mélanges de couleurs auxquels les élèves sont familiarisés depuis l'école maternelle : la **synthèse soustractive des couleurs**.

Ainsi le rouge et le vert ne donnent plus du marron mais du jaune ! De même le mélange des trois couleurs primaires ne conduit plus à quelque chose proche du noir mais au contraire à du blanc !!!

A titre d'exercice complémentaire, on pourra donner des teintes composites, que le logiciel affiche sur l'écran. Les élèves devront, après analyse, les reconstituer par synthèse additive. Ceci mettra bien en évidence le fait qu'à partir d'un petit nombre de couleurs on peut obtenir toutes les autres (Travaux de Ducos et Hauron).

En dernier lieu, puisque par addition de deux couleurs primaires prises deux à deux on obtient les trois autres couleurs complémentaires :

$$\mathbf{R} + \mathbf{V} \Rightarrow \mathbf{Jaune} \quad \mathbf{V} + \mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{Cyan} \quad \text{et} \quad \mathbf{B} + \mathbf{R} \Rightarrow \mathbf{Magenta}$$

on comprend alors que par soustraction de ces nouvelles couleurs, c'est-à-dire en faisant passer de la lumière blanche à travers des filtres **J, C, M**, on puisse retrouver les couleurs primaires :

$$\mathbf{M} - \mathbf{J} \Rightarrow \mathbf{Rouge} \quad \mathbf{J} - \mathbf{C} \Rightarrow \mathbf{Vert} \quad \text{et} \quad \mathbf{C} - \mathbf{M} \Rightarrow \mathbf{Bleu}$$

Remarque : renseignements pris sur les documents techniques de Kodak, les filtres type Wratten ne sont pas du tout monochromatiques.

Un réseau ou un prisme, permet à l'élève de vérifier dans tous les cas, que les teintes aussi variées soient elles, sont toujours composées de **R, V, B**.

Il est possible de compléter cette étude à l'aide du logiciel **SYNTHÈSE** édité par l'**A.D.A.S.T.A**^{*}, qui avec une carte VGA permet l'étude de ces compositions de couleurs primaires.

Remarque : compte tenu de ce mode on ne peut faire varier chacune de ces couleurs primaires que de 0 à 63, ce qui ne diminue en rien l'intérêt de ce logiciel.

* Voir rubrique «Parus ou à Paraître - Nous avons examiné» de ce numéro.

On a ainsi atteint l'objectif fixé par le programme, puisqu'avec un petit nombre de lois une combinaison linéaire de trois valeurs, on peut expliquer toutes les couleurs auxquelles notre œil est sensible. Le champ des applications est très vaste et le Professeur aura plutôt l'embaras du choix. Citons pour mémoire : les projecteurs utilisés dans les spectacles pour créer des effets... spectaculaires, les luminophores d'un écran de téléviseur ou de moniteur (synthèse additive), ou le principe de la photo en couleur (synthèse soustractive), etc...

Dans le second cas, le logiciel permet d'**illustrer un cours** : comme pour la séance de Travaux Pratiques on peut obtenir successivement les couleurs primaires, puis les couleurs complémentaires. Un ensemble de trois boucles imbriquées produit successivement les 16,7 millions de couleurs. Enfin, une procédure permet d'observer le défilement de l'arc-en-ciel.

Il est certain que ces expériences de cours gagneront beaucoup à être présentées à l'aide d'un caméscope, relié à un moniteur de taille raisonnable, si le lycée possède ce matériel.

3.2. Synthèse des sons

Le but du logiciel **SynthSon**, est de montrer quelles sont les caractéristiques d'un son musical. La synthèse d'un tel son est encore la meilleure façon de mettre en évidence ces caractéristiques.

Le principe repose sur une banque de données constituée de six signaux numérisés sur 8 bit, représentant une période de la fonction sinus, échantillonnés à une fréquence qui est la soixantième partie de la fréquence de la fonction (soit 60 points pour une période). Notons que cette «fréquence» de la fonction est pour l'instant purement fictive. C'est le **Fondamental** ou l'**Harmonique 1**. Les deux suivants représentent deux périodes consécutives, de fréquence double, échantillonnées de la même façon. C'est donc l'**Harmonique 2**. On procède ainsi jusqu'à l'**Harmonique 6**. Tous ces signaux (60 points), ont donc la même durée que l'on peut allonger par bouclage, si nécessaire. Leur amplitude prise conventionnellement à 1, est facilement modifiable.

Pour conserver chacune de ces soixantes valeurs sur un octet on utilisera des coefficients compris entre 0 et 1. L'échantillon correspondant à un niveau égal à 0 est représenté par le nombre 127. Le problème le plus délicat à résoudre est sans contexte, celui de la fréquence résultante. En effet elle dépend de la «fréquence» de la fonction signal

mais aussi de la fréquence avec laquelle l'ordinateur, suivi de la carte d'acquisition, suivi enfin des Convertisseurs numérique-analogique, est capable de produire les échantillons. On voit que la nature du langage utilisé, mais aussi la fréquence d'horloge de l'ordinateur et la rapidité du convertisseur, entrent en ligne de compte ! Dans la mesure où l'on utilise une carte d'acquisition, l'horloge dont elle est munie, rend le logiciel, indépendant du P.C. Reste à s'assurer que la conjugaison de tous ces paramètres permet d'obtenir un son audible !

Partant du **SOL 2**, à la fréquence de 196 Hertz, on doit pouvoir émettre l'Harmonique 6 soit 1 176 Hertz. En pratique il faut tester différents types de boucles dans la programmation de Candibus, afin de vérifier que l'ensemble est capable d'écrire :

$60 \times 196 = 11\ 760$ échantillons dans l'un des Ports A ou B, en une seconde !

Si le convertisseur suit ce «rythme», on obtiendra bien ce son.

Après quelques tâtonnements (dûs à la rédaction pas toujours très claire du document accompagnant Candibus), j'ai pu obtenir des résultats satisfaisants. On dispose d'une certaine «marge de manœuvre», permettant de changer la hauteur de la note et de pouvoir écrire, éventuellement, une mélodie.

On peut donc faire le choix de la **Hauteur** du son par la valeur que l'on donne à la fréquence du fondamental et faire le choix du **Timbre** et de l'**Intensité** du son par la combinaison linéaire des signaux utilisés.

Du fait que le signal est échantillonné et quantifié, on peut s'attendre à des signaux parasites dont l'origine est assez difficile à expliquer à un élève de Seconde, mais dont la présence ne lui échappera pas ! J'ai donc prévu sur chacune des voies A et B, un filtre passe-bas Butterworth à 18 dB par octave dont la fréquence de coupure est placée à 5 kHz.

Le choix de cette fréquence est lié au fait que les sons générés par ce dispositif peuvent servir à reconstituer des sons engendrés par des instruments, mais échantillonnés par Candibus et analysés à l'aide de **LABO**. Comme la fréquence maximale d'échantillonnage de cette carte est de 20 kHz, le Théorème de Shannon montre qu'on ne peut échantillonner des sons qui contiennent des fréquences supérieures à 10 kHz.

La «perte» dûe à la fréquence de coupure ne doit pas nuire à la comparaison entre l'original et la reconstitution, par contre elle garantit l'élimination de fréquences imprévisibles et indésirables.

Une **Première séance de Travaux Pratiques** peut se dérouler ainsi :

- Choix d'un seul harmonique (son pur) et émission pour constater :
 - que l'intensité sonore est liée à l'amplitude,
 - que la hauteur dépend de la fréquence, et que les notes engendrées par des harmoniques 1, 2, 3, 4 et 5, pris isolément, correspondent aux notes SOL 2, SOL 3, RE 4, SOL 4, SI 4 et SOL 5. La présence d'élèves tant soit peu musiciens doit permettre de mener à bien cette opération.
- Choix d'une combinaison linéaire d'harmoniques et émission du son :
 - vérification du fait que la hauteur perçue est celle du fondamental,
 - vérification du fait que le timbre est différent, qu'il est d'autant plus brillant que les harmoniques les plus élevés ont une amplitude importante,
 - vérification du fait que la modification de la phase de l'un des harmoniques, altère considérablement l'oscillogramme, mais n'altère pas le timbre. Malgré son très fin pouvoir d'analyse, l'oreille n'est pas sensible aux différences de phase entre les composantes harmoniques.

Une **Deuxième séance de Travaux Pratiques** peut se dérouler ainsi :

- échantillonnage d'un son issu d'un instrument ou d'un enregistrement analogique, à l'aide de CANDIBUS et de LABO,
- visualisation de l'oscillogramme,
- visualisation du spectre et tirage sur une imprimante ou un traceur des deux graphes,
- à l'aide du logiciel SynthSon, reconstitution de ce son et émission afin de le comparer à l'original,
- discussion sur les raisons pour lesquelles on constate éventuellement une différence.

On peut se servir de **SynthSon pour illustrer un cours**, en utilisant les fonctionnalités indiquées précédemment. Le niveau des sorties

filtrées est de l'ordre de 2 V et permet d'attaquer directement une entrée auxiliaire d'un amplificateur de puissance. Il est clair qu'en Travaux Pratiques, des casques sont appréciables !

4. CONCLUSIONS

La réalisation matérielle nécessite un investissement minime mise à part la triple D.E.L. qui coûte deux cent cinquante francs (on peut trouver des triples D.E.L. pour une soixantaine de francs, mais non monochromatiques). En effet, les convertisseurs DAC 0808 sont à trente neuf francs et les amplis opérationnels sont d'un modèle courant (le niveau des signaux ne nécessite pas d'ampli faible bruit). Le coffret métallique, la lentille et l'alimentation symétrique étant de la récupération, restent le circuit imprimé, les condensateurs (de précision $\approx 5\%$) pour les filtres et les différents connecteurs.

Si l'on dispose d'une carte équipée de C.N.A., il est certain que le travail sera grandement facilité.

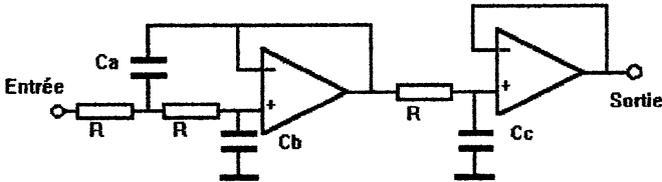
Les logiciels TRICHROM et SYNTHSON seront diffusés par l'U.d.P.

Annexe

Nécessité d'un filtre passe-bas

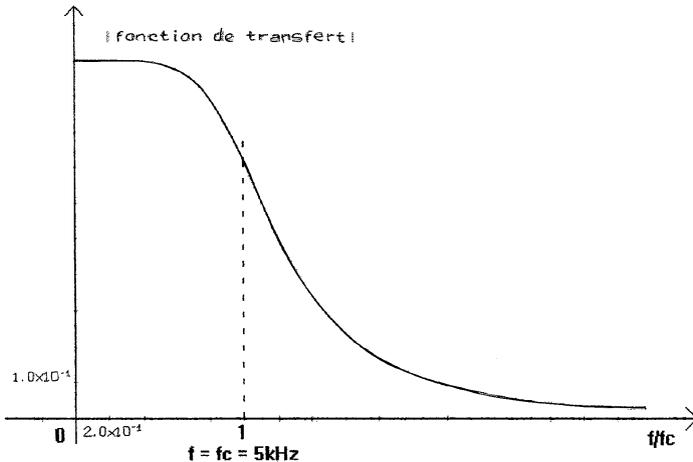
Du fait de la construction des signaux sinusoïdaux par un procédé numérique, le signal ainsi obtenu peut être considéré comme une sinusoïde pure à laquelle se superpose un bruit de quantification. Ce signal d'erreur engendre de par sa forme, des fréquences multiples de la fréquence de la sinusoïde, donc des harmoniques de rang élevé, mais aussi des fréquences, bien supérieures à la fréquence d'échantillonnage. Toutes ces fréquences peuvent créer par battements des fréquences audibles, perturbant le signal sinusoïdal souhaité.

Comme les sinusoïdes nécessaires à la synthèse ont des fréquences comprises entre 130 Hz (fondamental de Do 1) et 785 Hz (harmonique 6), une fréquence de coupure $f_c = 5000$ Hz constitue un bon compromis.

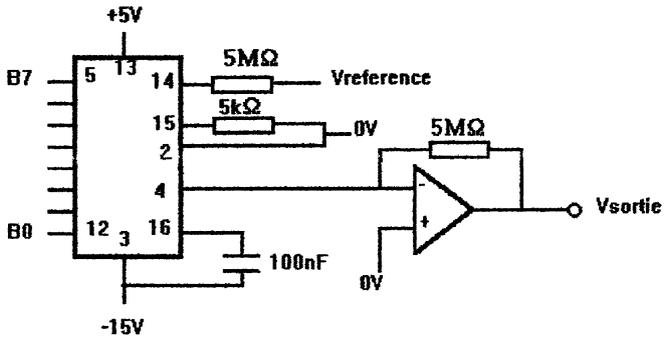


Filtre Butterworth passe-bas 18 dB/octave

$f_c = 5$ kHz ; $R = 10$ k Ω ; $C_a = 6,37$ nF ; $C_b = C_a/4$; $C_c = C_a/2$.



Courbe de réponse du filtre Butterworth à 18 dB/octave.



Convertisseur Numérique-Analogique DAC 0808 (National Semiconductor)

$$V_{\text{sortie}} = V_{\text{ref}} \cdot [B7/256 + B6/128 + \dots + B1/4 + B0].$$

